

断层影响带的发育规律及其力学成因

雷光伟¹, 杨春和^{1,2}, 王贵宾², 陈世万¹, 魏翔¹, 霍亮¹

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044;

2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要: 断层影响带的发育规律和范围是高放废物处置库选址和设计的重要内容之一。采用现场测量和图表分析方法, 研究断层两侧节理平均迹长和中点面密度与距断层距离之间的变化规律, 结果表明: (1) 平均迹长随断层距离增加而变大, 中点面密度随断层距离增加而变小, 且变化特征均符合负指数函数形式; 当距离超过断层影响带宽度 d_0 , 节理平均迹长和中点面密度均稳定在某一值附近波动。据此将断层影响带分为严重破坏区 I 和影响区 II 两个区域; (2) 断层类型不同, 断层影响带大小和发育规律存在显著差异, 其中, 正断层最小, 平移断层次之, 逆断层最大; 平移断层两盘的影响带近似呈对称分布, 而正断层和逆断层呈上盘宽、下盘窄的不对称分布。此外, 断层影响带宽度与断层长度之间服从幂函数形式。分析认为: 呈现上述变化特征和发育规律的原因主要是岩性和形成断层时的力学机制不同。研究结果对岩体结构面均质区划分、地下水分布和处置库设计等具有重要的工程指导意义。

关键词: 岩石力学; 断层影响带; 节理; 中点面密度; 平均迹长; 构造应力

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2016)02-0231-11

The development law and mechanical causes of fault influenced zone

LEI Guangwei¹, YANG Chunhe^{1,2}, WANG Guibin², CHEN Shiwan¹, WEI Xiang¹, HUO Liang¹

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: Fault influenced zone is one of the key factors in site selection and design for high-level radioactive waste repository. Field survey and chart analysis were used to obtain the relationship between the fault distance and mean length of traces, the midpoint density of both sides of fault. When the distance increases, the mean trace length increases and the midpoint density decreases. The correlations obey a negative exponential function. When the distance exceeds the width of the fault influenced zone, the mean trace length and the midpoint density fluctuate at a certain value. Accordingly, both sides of the fault can be divided into two regions: serious influenced zone I and influenced zone II. The width of the maximum influenced zone and the distribution are markedly different among different fault types, the one of the normal fault is the smallest, the one of the strike-slip fault is the second, and the one of the reverse fault is the largest. Meanwhile, the influenced zone of the strike-slip fault

收稿日期: 2015-01-19; **修回日期:** 2015-03-30

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(40802078)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No.40802078)

作者简介: 雷光伟(1985-), 男, 2010年毕业于重庆大学采矿工程专业, 现为博士研究生, 主要从事断层、节理及核废料处置等方面的研究工作。E-mail: guangweilei@163.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2015.0059

shows a symmetrical distribution, and the normal and reverse faults show asymmetrical distribution. The width of fault influenced zone and the length of fault obey a power function approximatively.

Key words :rock mechanics ;fault influenced zone ;joints ;midpoint densities ;mean trace length ;tectonic stresses

1 引言

断层和节理是地壳浅层中广泛发育的断裂构造,这类结构面破坏了岩体的连续性、完整性,影响、控制着岩体的力学和渗流特性。断层影响带是指在断层形成过程中,距主断层两侧一定范围派生或伴生的次级构造,即断层两侧的节理发育带,其发育规律和形成机制与主断层密切相关,也称诱导裂缝带^[1]。断层影响带内的岩体在物理力学特性上与正常围岩有显著差异^[2]。断层影响带和断层破碎带(也叫“充填带”)一起,共同构成了地下水的主要储聚场所,导致这一区域具有强度低、变形大、透水性强等特征,是地下硐室、巷道和隧道等施工过程中的难支护、多事故地段^[3-4],该地段的存在给水库、大坝和高放废物处置库等大型地下工程带来重大安全隐患。

相关学者对节理、断层及断层破碎带已做过大量研究。张鹏程等^[5]根据室内实验分析了岩体节理到脆性断层的形成过程;李月^[6]研究了在不同应力条件下断裂带结构的发育特征;武红岭等^[7-8]的研究表明:断层两侧一定范围及断层内部均是相对低应力区,且应力大小和方位主要受构造的空间分布、运动机制及岩性影响;周小平等^[9]从数学、力学的角度定量分析了各序级构造的空间组合;武钢等^[10-11]的研究表明:破碎带宽度随断层错距存在线性增大的规律;刘志刚和刘秀峰^[12]利用特殊节理(I_1 节理组)预测隧道掌子面前方隐伏断层几何特征的专利技术——断层参数预测法;董进等^[13]研究了正断层位移与长度之间的数量关系。上述研究多侧重于断层破碎带特征及断层两侧地应力分布,或破碎带与断距的关系,而关于不同性质的断层两盘及沿断层走向的断层影响带发育规律缺乏较深入的定量研究。研究的最终目的主要是指导工程实践,在具体操作时,这些研究方法或参数的选取在经济性和适用性方面存在一定局限性。一方面,地应力大小、方向对褶皱和隆起等地质构造、地形地貌及岩性等因素变化反应敏感^[14],其变化规律和分布特征比较复杂;此外,测量地应力需要投入大量经费和人力,在断层附近大面积布点测量地应力并不现实,而仅

根据少数几个测点的地应力数据得出的研究结果,可信度不高;另一方面,由于风化、沉积物覆盖或外力改造等因素,有时在野外辨别和准确测量断层错距很难实现,且需操作者具有丰富的野外地质经验。

甘肃北山预选区是我国高放废物处置库的有利候选地段之一^[15-17],对该地区断层影响带发育规律和范围的研究,以更好地服务于我国高放废物处置库工程设计,是一个亟需解决的重要课题。本文基于北山地区地表结构面现场测量和数据分析,研究该地区断层影响带发育规律,及断层长度与断层影响带宽度之间的数学关系,并分析导致这种发育规律的地质力学原因。以期为我国高放废物处置库北山预选区岩体均质区划分、渗流特性和核素迁移规律等研究提供参考和依据。

2 地质背景及现场调查

北山地区地处甘肃省西北部,属塔里木板块东北缘,位于塔里木—中朝与哈萨克斯坦、西伯利亚板块交汇处^[16-18],气候干旱,植被稀少,环境恶劣,基岩裸露。出露地层包括前长城系敦煌岩群、长城系咸水井群、下石炭统沙枣泉组、侏罗系、下白垩统新民堡群及第四系堆积层^[19-20],地层走向近东西向。新场地段新构造运动总体强度表现较弱,以差异性升降运动为主^[16]。岩性主要为花岗闪长岩和二长花岗岩,属中、晚元古代岩浆活动的产物,地表岩石新鲜,基本没有蚀变,呈大面积岩基广泛发育,他们与前长城纪变质岩系结晶基底^[16,20]。地表岩体露头和地貌特征以低山丘陵~戈壁为主,受风化、剥蚀而破碎严重,部分地区被第四纪沉积物覆盖,以残积、残坡积、坡洪积、洪积等为主。其厚度大小不一,新场地块南侧呈近EW向大片分布的第四纪沉积物厚5~10m,其形成主要受EW向逆断层控制;而新场地块内零星分布的第四纪沉积物厚2~4m,其分布特征主要受NE向正断层控制。

由于北山地区的地层岩石多形成于中生代以前^[18],尽管大多岩石裸露地表,通过野外调查,并辅以卫星遥感信息能识别构造形迹,但部分地质现象仍很难观察。北山地区是我国最有远景的高放废物深埋处置库预选区^[15,17]。因地处不同板块交汇部位,其

构造关系比较复杂，研究这一地区的基础地质构造及断层影响带发育规律对我国高放废物处置库选址和设计具有重要工程意义。在北山地区新场地块地表结构面遥感影像解译和现场调查的基础上，结合该地区相关地质资料^[16, 18-21]，绘制新场地段地表断层分布简图如图 1 所示，图 2 为新场地段地质剖面图。

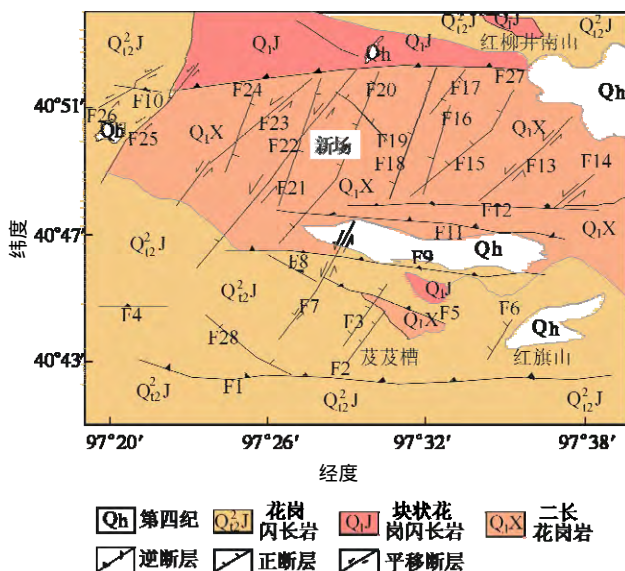


图 1 新场地段地表断层分布简图

Fig.1 Diagram of distribution of surface faults for Xinchang section

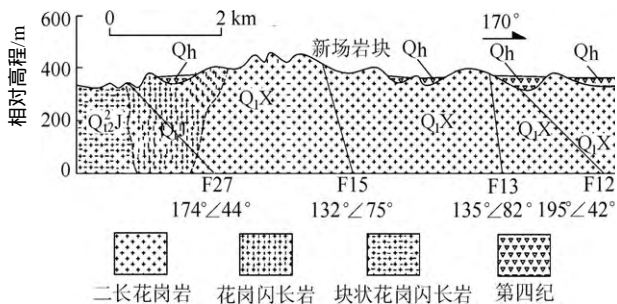


图 2 新场地段地质剖面图

Fig.2 Geological section for Xinchang

受古板块多期次碰撞、对接以及中生代以来板块内构造活动的影响，早期的伸展变形、造山期逆冲推覆变形和造山期后褶皱冲断变形相互叠加、干扰和置换，形成了研究区 SN 以区域性东西向断裂、褶皱和韧性剪切带为主，中部以岩浆热动力变形和北东向断裂为主导的构造格局^[19, 21]。北山新场地段的断层和裂隙构造比较发育，根据图 1，结合该地区相关地质资料，可以得出北山地区新场地段的断层有如下特点：

(1) 断层分布具有明显的方向性和规律性，按走向主要可以分 2 组：一组在 NE 向 30°~60° 范围，

另一组近 EW 向，此外，也有少量 NW 向断层发育。

(2) 近 EW 向断层均为逆断层，延伸长，最早形成于海西期。多以平行排列的断层或断层组形式产出，均为压性或压扭性断层，并受控于深大断裂，对北山地区的构造发展史、地壳稳定性有决定性的影响。

(3) NE 向断层多为具有左旋走滑运动分量的正断层，延伸长度较 EW 向断层小，形成于印支—燕山期，切割近 EW 向逆断层，属近 EW 向次级脆性断层，呈“树枝状”展布，与 EW 向逆断层一起，将区内大多岩石地层分割成四边形块体。北东向断层为浅层次的张性或张扭性质，这些断裂控制了中生代盆地的形成与发展。NE 向断层的规模及运动特征主要受近 EW 向逆断层控制。由于地壳深部的构造运动，塔里木板块向北俯冲北山造山带，导致北山地区的断裂构造具有多向北倾的特点^[18]。

以北山地区新场地段断层及地表露头节理为主要调查对象，借助遥感影像图，结合室内遥感影像解译。调查了图 1 中新场和茆茆槽地块部分断层的长度、产状、类型和破碎带大小等参数，以及断层两侧露头节理的产状、迹长、间距等几何特征。累计测量 600 多个露头，10 000 多条节理。其中，对图 1 中走向近 EW 向逆断层 F12 和 F5；NE 向平移断层 F7 和 F13；NNE 向的正断层 F3，F15 和 F20 及其两侧露头节理做了较详细的调查。

根据现场调查和测量结果：研究区出露大量露头，区域性裂隙构造较发育，包括不同构造时期、不同应力作用形成的张节理、剪节理、张剪性节理及区域性节理。有单一的原生构造节理，也有各类节理的复合与新生。主要发育 4 个节理优势组，分别是：45°/74°，167°/81°，243°/78°，310°/67°，此外，也有 NEE 向、NNW 向和近 EW 向的节理发育。北山新场地段广泛发育的断层、节理等岩体结构面，是地下水储存、滞留的主要场所，也是高放废物处置库核素迁移的关键通道，对处置库工程的成败与否具有至关重要的作用。因此，关于该地区断层影响带发育规律及范围的研究很有必要。

3 断层影响带发育规律及其与断层长度的关系

断层、节理的形成和分布，并不是孤立现象，他们受到区域应力场或局部应力场控制，往往相伴出现，或节理以断层的派生构造而存在。断层两侧

岩体节理的几何特征及空间展布与主断层密切相关，反映了断层的形成和活动，查明断层附近次级构造的发育规律，不仅可以阐明大构造的几何特征，也在很大程度上揭示了主断层形成的古构造应力场，这也正是通过分析断层两侧的节理特征研究断层的前提和理论基础。当前，国内外关于构造地质学的趋势是主张把大型构造、中型构造和小型构造结合起来研究^[22]，才可能得到更加客观、全面的认识，而不主张孤立地研究某一级别的构造。基于北山地区不同类型和规模的正断层、逆断层及平移断层两侧露头节理的现场调查，采用圆形窗口法^[23]，对断层两侧露头的节理平均迹长 v 和中点面密度 λ 两个参数进行统计分析，以此研究断层影响带的发育规律。

3.1 断层影响带内节理发育规律研究

从断层面(断层中心，此处断层影响带宽度 D 往往最大)计起，垂直断层走向，由近及远，设多个区段，区段间隔约 20 m，各区段内选取 2~3 个露头进行现场节理测量和数据分析，计算各露头节理中点面密度 λ 和平均迹长 v ，取其均值。研究随着距断层面距离 d 变远，节理平均迹长和迹线中点面密度的变化规律，确定断层影响带大小 d_0 ，原始数据处理结果见表 1。

根据表 1 数据，分别绘制平移断层左、右盘和正断层、逆断层上、下盘相应的变化曲线。

平移断层 F13：延伸约 4.11 km，NE 向 38°~47°，倾角 72°~84°，图 3(a)，(b)分别为平移断层左、右两盘的 $\lambda-d$ 和 $v-d$ 变化曲线。

根据图 3 可知，平移断层两盘节理变化特征和分布规律：在断层面附近，节理中点面密度很大，平均迹长很小，随着距断层面变远，节理中点面密度快速变小，与此同时，平均迹长变大，节理连续性增强。从图 3 可以看出，在距断层面约 20 m 范围内，迹线中点面密度和平均迹长变化率均较大，之后变化幅度明显减小。当距断层面约 120 m 时，中点面密度在 0.026 条/m² 上下波动，同时节理平均迹长稳定在约 20.5 m 附近变化。可以认为：此时岩体节理发育已趋于稳定，接近该地区正常围岩的节理发育特征，断层不再对两侧岩体节理发育产生影响。对比图 3(a)，(b)变化曲线，平移断层两侧岩体的断层影响带大小很接近，平移断层的断层影响带呈对称分布。

正断层 F15：延伸约 4.36 km，北东向 35°~53°，倾角 63°~75°，图 4 为正断层上、下两盘节理的 $\lambda-d$ 和 $v-d$ 曲线及拟合公式。

由图 4 可知，正断层上、下两盘断层影响带内节理发育特征：距断层面越近，节理平均中点面密度越大，平均迹长越小；越远离断层，节理中点面密度变小，平均迹长变长，且在距断层面附近约 15 m 范围内变化幅度最大。比较图 4(a)，(b)，对上

表 1 原始数据处理结果
Table 1 Results of the original data processing

平移断层左盘			平移断层右盘			正断层上盘			正断层下盘			逆断层上盘			逆断层下盘		
d/m	v/m	λ/m^{-2}	d/m	v/m	λ/m^{-2}	d/m	v/m	λ/m^{-2}	d/m	v/m	λ/m^{-2}	d/m	v/m	λ/m^{-2}	d/m	v/m	λ/m^{-2}
11	6.51	0.082	8	6.16	0.078	10	7.31	0.068	7	7.96	0.055	8	5.11	0.110	10	6.65	0.077
27	10.17	0.058	30	10.44	0.060	32	11.85	0.045	28	12.62	0.041	27	9.55	0.071	30	10.52	0.054
49	13.58	0.049	45	13.89	0.047	47	14.69	0.037	51	15.75	0.033	51	13.69	0.052	47	13.32	0.043
68	15.41	0.043	70	15.95	0.041	66	16.95	0.031	69	17.91	0.029	69	15.75	0.045	66	16.41	0.036
90	18.05	0.034	86	17.67	0.036	85	17.67	0.029	88	18.57	0.026	88	17.17	0.04	85	17.67	0.031
108	18.64	0.031	111	18.93	0.032	109	18.43	0.026	112	17.93	0.027	109	17.93	0.036	111	18.56	0.028
127	19.83	0.028	129	19.38	0.029	128	19.28	0.024	126	19.42	0.023	131	18.68	0.034	128	18.22	0.025
145	19.50	0.026	148	20.17	0.028	146	18.17	0.027	149	18.50	0.026	148	19.07	0.032	150	19.20	0.029
171	20.44	0.030	167	19.65	0.030	165	18.75	0.026	169	18.24	0.022	166	19.75	0.028	169	19.44	0.024
189	19.07	0.028	185	19.47	0.025	188	17.93	0.022	185	19.51	0.021	190	19.51	0.030	185	18.68	0.028
207	19.83	0.024	210	20.33	0.028	205	19.01	0.025	209	18.62	0.024	208	20.44	0.026	209	18.27	0.023
												227	19.82	0.029	225	19.33	0.027

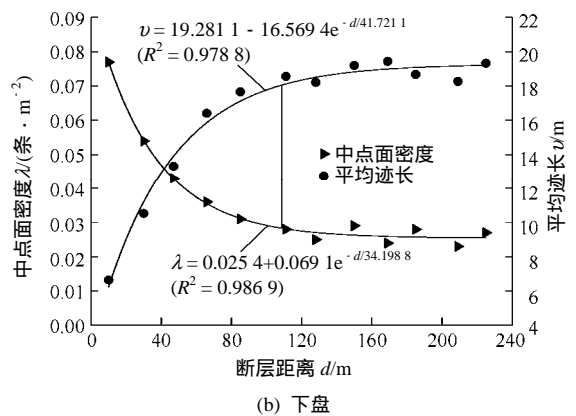
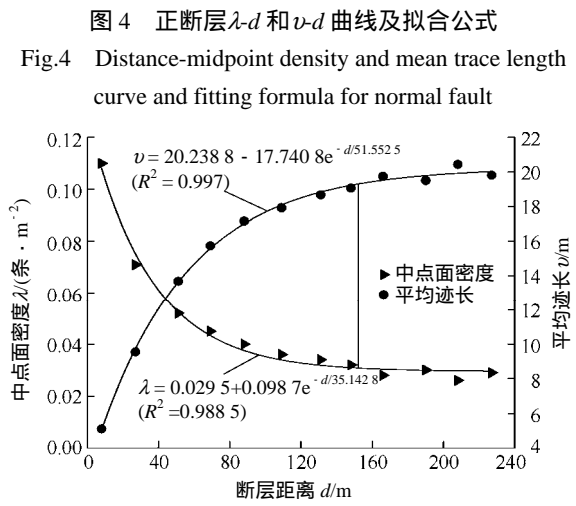
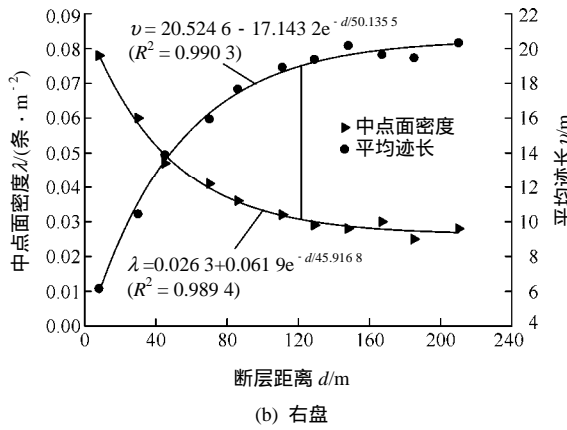
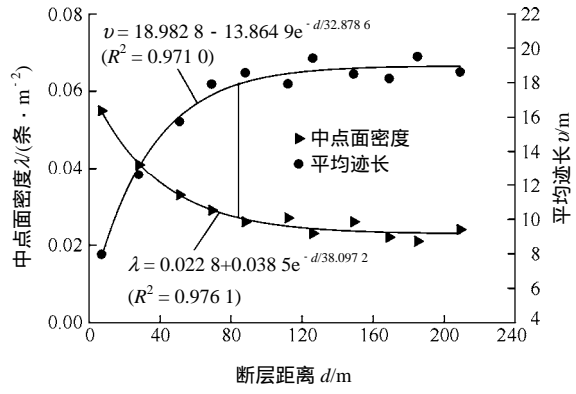
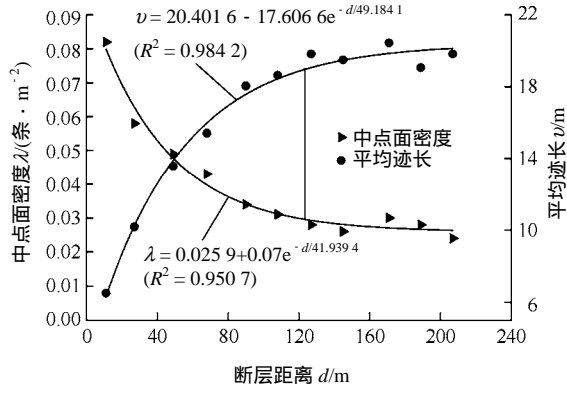


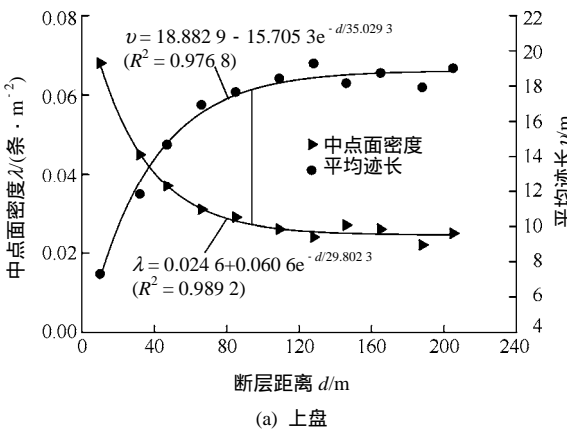
图 3 平移断层 λ - d 和 v - d 曲线及拟合公式
Fig.3 Distance-midpoint density and mean trace length curve and fitting formula for strike slip fault

图 4 正断层 λ - d 和 v - d 曲线及拟合公式
Fig.4 Distance-midpoint density and mean trace length curve and fitting formula for normal fault

图 5 逆断层 λ - d 和 v - d 曲线及拟合公式
Fig.5 Distance-midpoint density and mean trace length curve and fitting formula for reverse fault

盘，当距断层超过约 100 m 时，节理中点面密度稳定在 0.024 条/m² 附近，平均迹长稳定在约 19 m，表明当远离断层面超过 100 m 时，断层对上盘岩体几乎没有影响。而断层下盘在距断层面约 80 m 时，节理平均迹长和中点面密度已趋于稳定。由此可见，正断层两盘的断层影响带宽度呈现上盘宽、下盘窄的不对称分布特征。

逆断层 F12：延伸约 4.57 km，NNW 向 275°~295°，倾角 35°~42°，图 5 为逆断层上、下两盘节理的 λ - d 和 v - d 曲线及拟合公式。



从图 5 可以看到：靠近断层面，中点面密度最大，节理迹长最短，远离断层面，中点面密度逐渐变小，迹长逐渐增加，在距逆断层约 25 m 内变化幅度很大，之后变化幅度随距离增加而明显减弱。上盘影响带中节理平均迹长在距在距断层面约 150 m 时，节理中点面密度和平均迹长趋于稳定；而下盘在距断层面 110 m 左右时，节理发育已趋于稳定，由此可见，平移断层两盘的影响带大小差异

很大。对比图 5(a), (b), 逆断层上、下两盘的断层影响带宽度不同, 即逆断层两侧的断层影响带宽度呈现上盘宽、下盘窄的不对称分布形式。

对比图 3~5 可知: 无论正断层、逆断层, 还是平移断层, 越靠近断层, 节理平均迹长越短, 迹线中点面密度越高, 表明岩体裂隙发育程度和破碎度越高, 对断层长度在 4 km 左右时, 临近断层面约 20 m 的小范围内, 岩体节理受断层影响程度最严重, 节理平均迹长短, 中点面密度大。当断层延伸较小时, 断层影响带内的严重破坏区宽度也变窄; 同样, 随断层规模增加, 严重破坏区范围增大。超过这一区域, 尽管节理平均迹长和中点面密度仍有变化, 但变化幅度明显减弱, 表明距断层越远, 岩体受断层影响程度越低。当距断层距离超过断层影响带宽度, 断层将不再对其两侧节理发育造成影响。此外, 在正常围岩体内的节理, 节理组数较少且稳定, 且越靠近断层面, 节理组数在增加, 在断层面处达到最多。且节理平均迹长和中点面密度随距离的变化形式分别表达为

$$v = \bar{v} + me^{-d/n} \quad (1)$$

$$\lambda = \bar{\lambda} + ae^{-d/b} \quad (2)$$

式中: m, n, a 和 b 均为与岩性、区域应力场、断层性质和规模等相关的拟合常数; \bar{v} 为正常围岩的平均迹长; $\bar{\lambda}$ 为正常围岩的迹线中点面密度。

结合野外调查: 不同性质的断层, 其两侧节理特性有所差异, 平移断层和逆断层两侧临近断层面主要发育剪节理, 节理延伸短, 节理面平直光滑, 产状稳定, 张开度小, 多处于闭合状态, 在断层两侧多呈羽状排列。“X”字型剪节理发育良好, 断层面附近发育有挤压片理或劈理构造, 可见大量破碎岩、角砾岩、断层泥等。而正断层两侧既有剪节理, 也有大量张节理发育, 节理面曲直不平, 产状不稳定, 延伸短, 张开度较剪节理大, 偶见石英脉充填其中, 岩脉与围岩呈焊接式接触, 部分节理隙间充填碎屑、泥土, 甚至长有植物, 此外, 还有少量张性剪节理。断层岩主要为角砾岩和碎裂岩, 角砾岩棱角明显, 大小混杂, 胶结松散, 伴有少量断层泥。在空间展布上, 剪节理多属断层的派生构造, 是由断层位移产生的局部应力场形成的, 一组与断层呈小角度相交, 交角多为 $10^\circ \sim 30^\circ$, 锐角尖端指示本盘岩层位移方向, 节理倾角大, 间距小; 另一组剪节理与断层呈大角度相交, 交角多为 $50^\circ \sim 75^\circ$, 节理间大致呈等间距分布, 次级构造与主断层在平

面上呈雁行状排列。张节理与断层产状平行或近似平行, 属断层的伴生构造, 还有大量节理没有明显规律, 多属风化节理。这些不同方向和性质的节理将断层两盘岩体切割成各种三角形、四边形等块体状, 极大破坏了岩体的连续性、完整性。

根据断层影响带内节理发育规律和岩体受破坏程度, 在垂直断层面方向, 距断层面由近及远, 可将断层影响带依次分为 2 个区域: 严重破坏区 I 和影响区 II, I 和 II 区共同构成断层影响带宽度。I 区主要特征: 岩体严重破裂, 节理高度发育, 节理走向与断层斜交岩体被节理纵横切割, 岩体破碎, 节理连续性和岩体完整性均很差, 岩体风化严重, 其物理和力学性能与正常围岩有显著差异; 节理间距小, 迹长短, 密度大; II 区主要特征: 相比 I 区, 岩体节理受断层的影响程度有所好转, 岩体风化和破碎程度明显降低, 节理较发育, 节理间距变大, 中点面密度变小, 岩体完整性逐渐增强, 随着距断层距离变远, 节理走向具有一定方向性和规律性。断层影响带之外属区域正常围岩, 其节理主要特征: 节理迹长、节理间距和面密度均较稳定, 节理产状主要集中在几个优势方向, 且岩体连续性和完整性明显比断层影响带好, 即该区域内的岩体节理发育规律和岩石的物理力学性质不再受断层影响。可见, 断层影响带在垂直断层面走向上具有分带性。

从断层中心位置向断层两端, 根据断层规模, 每隔约 300 m, 垂直断层面布置一定数量的露头测点, 计算在同一断层不同位置的断层影响带宽度, 研究整条断层的断层影响带沿断层走向的发育规律。采用正断层 F15 及两侧露头节理参数进行分析, 断层延伸约 4.36 km, 断层影响带上盘宽度沿断层走向发育特征直方图如图 6 所示。

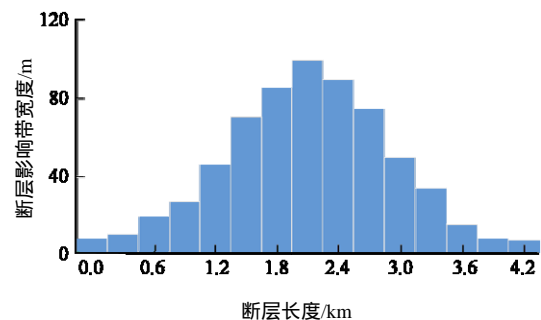


图 6 正断层 F15 不同位置处影响带宽度直方图
Fig.6 Histogram of influenced zone width for different positions of normal fault F15

从图 6 可以知道：在断层中心位置附近，断层影响带宽度最大，沿断层两端，断层影响带宽度带逐渐变小。在断层两端尖灭处，断层不再继续延伸，但断层影响带依然存在，出现这种现象的原因是：断层是从节理岩体中的多组微节理或微裂隙在构造应力作用下产生张破坏、或剪破坏、或二者的组合，在后期应力作用下，微裂隙或微节理形成大量产状相近的节理“带”，因节理之间岩桥的存在，节理继续扩展、贯通，最后形成具有一定规模宏观断层^[5]。断层形成后，由于聚集在岩体内的能量释放和断层附近应力降低，断层停止错动、扩展，但此时在断层两端处仍有大量断层的伴生节理并没有相互贯通，所以，相比正常围岩，断层两端处一定范围内的节理发育程度更高。此外，根据对断层两端地应力测试结果^[6-8]：断层两端地应力较高，是应力集中区，这也印证了断层两端一定范围节理发育程度较正常围岩高。图 7 为断层影响带分布规律示意图，图中断层影响带宽度从断层中间向断层两端逐渐减小，表明断层在走向上有分段性。

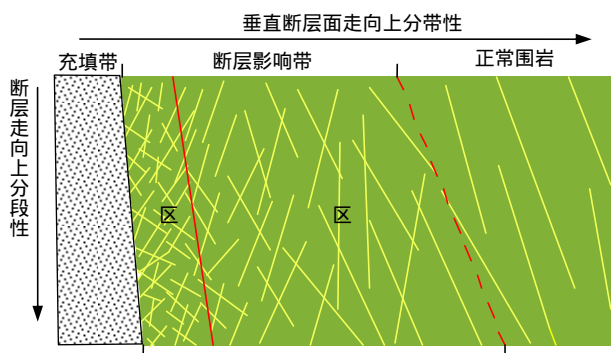


图 7 断层影响带分布规律示意图
Fig.7 Diagram of fault influenced zone

3.2 断层影响带宽度与断层长度的关系

为研究不同规模的断层，其两侧的断层影响带宽度变化规律，采用节 3.1 中的方法计算不同性质和规模的断层影响带宽度，结合现场调查数据，结果见表 2。以此研究断层影响带宽度 d_0 (m) 与断层长度 L (km) 之间的关系。特别说明：由于在同一断层的不同位置，其断层影响带宽度不同，且断层影响带最大宽度往往在断层中心位置附近，沿断层两端逐渐变小。因此， d_0 为断层其中一盘断层中心处的最大影响带宽度，而不是断层两盘的影响带宽度相加。鉴于正断层和逆断层上、下两盘断层影响带大小不同，且上盘宽，研究时统一使用断层上盘的最大影响带宽度进行分析。

表 2 断层长度与对应的最大断层影响带宽度

Table 2 The length of faults and the corresponding width of fault influenced zone

逆断层		正断层		平移断层	
L/km	d_0/m	L/km	d_0/m	L/km	d_0/m
2.43	120	0.85	40	0.74	58
4.57	150	2.27	75	2.45	97
6.88	178	4.36	100	4.11	120
9.71	195	5.83	115	6.68	145

图 8 为断层长度与断层影响带宽度的变化曲线，由图 8 可知，无论是平移断层、正断层还是逆断层，均有一个共同点：随断层规模增大，断层影响带宽度也随之增加，但增大幅度随断层规模的变大而逐渐降低。其中，正断层在约 5 km 的长度范围内变化幅度较大；平移断层约在 6 km；逆断层约在 7.5 km，在那之后，图 8 中各曲线趋于平缓，表明随着断层进一步扩展，其两侧影响带范围增大的幅度逐渐减小。与此同时，断层长度相近而断层类型不同，断层影响带宽度存在显著差异，其中正断层最小，平移断层次之，逆断层最大，但 3 种类型断层的 $d_0 - L$ 变化趋势均服从幂函数形式：

$$d_0 = kL^c \tag{3}$$

式中： k 和 c 为与区域应力场、断层性质和岩性等有关的拟合常数。图 8 中，3 条曲线均具有较高的拟合度 ($R^2 > 0.98$)。

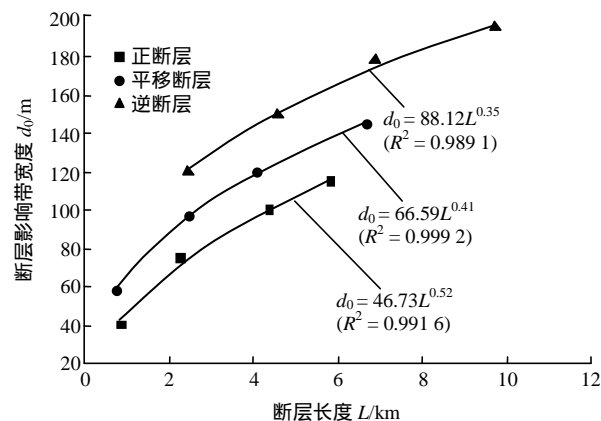


图 8 断层长度与断层影响带宽度的变化曲线

Fig.8 Curves of fault length and width of fault influenced zone

4 断层影响带发育规律的地质力学成因

断层影响带宽度及其发育规律的影响因素有很

多，主要包括断层破裂的发生和断层的形成、断层作用过程、应力状态、岩石力学性质、断层类型、地层厚度及断层形成环境的物理状态等多种因素。其中，导致平移断层、正断层和逆断层两盘断层影响带分布规律呈现明显差异的最主要原因是岩性和形成断层时受到的应力状态不同。在断层形成后，断层周围一定区域产生局部应力场^[18,20]，使得断层两侧岩体的应力状态发生改变。沿断层走向，不同断层位置两侧的岩体，受构造应力作用的变形大小和能量聚集程度不同^[20]，在断层中心位置附近，岩体因构造应力作用产生弯曲、扭转，承受的形变量往往最大，聚集在岩体中的应变能多，沿断层两端形变程度逐渐降低，聚集在岩体内的能量也逐渐减少，而岩体破裂产生结构面是一个集聚在岩体中的能量释放的过程，导致断层影响带沿断层走向出现明显的分段性。在垂直断层方向，影响带内的节理发育度呈负指数形式衰减，其主要原因是：在断层位移过程中，越靠近断层面，因断层位移产生的变形越大，越远离断层面，岩体因断层位移而产生的变形量在降低^[24]；此外，根据地震学相关研究，断层形成时以地震波形式释放的能量在岩体中随距离增加也是呈负指数衰减规律^[25-28]。

根据室内力学试验知道：岩性不同，岩体力学和物理特性有较大差异^[14]，且岩石的抗拉强度远小于抗剪强度，大小约为后者的 1/3。但由于自然界中的岩体均处于三维应力状态下，发生拉伸破坏的机会较小，其破坏形式主要是剪切破坏，由于不同岩石的矿物组成、颗粒间结构、孔隙度以及含水率等因素不同，不同岩石的剪切强度差异明显，在同样的应力环境下，低强度的岩石更容易发生破裂，形成节理。

根据 Anderson 断层模式：在形成断层时的三轴应力状态中，有 2 个主应力轴水平，主应力轴垂直或近似垂直于水平面。断层应力状态如图 9 所示。

(1) 正断层： σ_1 竖直， σ_2 和 σ_3 水平，当竖直方向的差应力 $\Delta\sigma$ 大于断层面的摩擦阻力时，上盘顺断层面倾斜向下滑动。根据形成正断层的应力状态和莫尔圆知道：水平拉伸和垂直上隆最利于正断层发育，当断层面形成后，在拉伸条件下，断层面空间相对“开放”，有利于聚集在岩体中的能量(主要是弹性势能和重力势能)释放^[24]，断层两侧岩体受破坏程度降低，由于正断层上盘往往是主动盘，且断层上盘比下盘“薄”，上盘岩体相对更容易被破坏。且正断层受水平拉伸或竖直方向的应力作用，

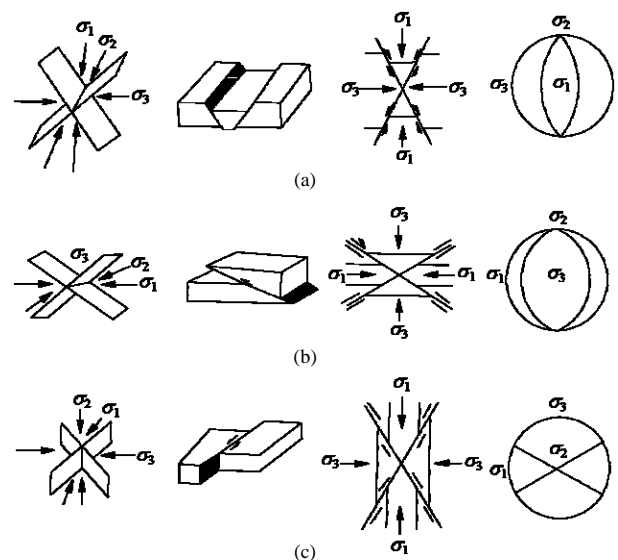


图 9 断层应力状态

Fig.9 Stress state of faults

上、下盘间因摩擦而发生剪切破坏的机会较小。因此，对规模相同的断层，正断层两侧的断层影响带宽度较小，且呈现上盘宽、下盘窄的不对称发育规律。

(2) 逆断层： σ_1 和 σ_2 水平， σ_3 竖直。逆断层的应力状态和莫尔圆表明；逆断层主要是在地壳收缩、水平挤压的应力条件下形成的。而水平挤压不利于聚集在岩体内应变能的释放，且在断层面形成后，断层上、下两盘相互挤压、摩擦、发生错动，断层两侧的岩体不仅受到以应力波形式释放的应变能破坏，同时还受到两盘错动的剪切破坏，而逆断层大多倾角较小($< 45^\circ$)，上盘向上运动，且相对更“薄”，向上最易减压，可见上盘岩体更容易遭受破坏。因此，逆断层两侧断层影响带宽度较大，且呈现上盘宽、下盘窄的不对称发育规律。

(3) 平移断层： σ_1 和 σ_3 水平， σ_2 竖直，和逆断层一样，大体上平移断层也因水平挤压而形成。区别在于：平移断层是几乎平行于挤压力的水平方向最易减压，断层面几乎直立，断层两盘沿断层面侧向运动。平移断层两侧岩体既遭受集聚在岩体内的能量释放的破坏，由于断层面凹凸不平，在断层形成过程中，两盘岩体同时也遭受两盘错动时的剪切破坏，而节理形成(岩体破裂)有利于应变能释放。此外，平移断层的倾角很大，近乎垂直，左、右两盘厚度接近。因此，平移断层上、下两盘岩体断层影响带宽度近似呈对称分布。

以上基于形成断层时的应力状态不同，定性分析了不同断层两侧岩体的断层影响带发育规律存在较大差异的地质力学成因。根据李月等^[6-7,14]对断

层附近地应力分布测量及模拟研究结果：在断层中心至远离断层面，地应力由小变大，方向复杂多变，最后趋近于区域主应力大小和方向，而构造裂缝发育程度与构造应力值之间存在正相关性，即构造应力的低、高值区一般与构造裂缝发育、不发育区域相对应。此外，沈国华等^[29-31]基于线弹性理论和模型，结合格里菲斯准则和莫尔-库仑准则，采用构造裂缝数值模拟技术模拟断层附近构造裂缝的空间分布，模拟结果基本符合裂缝实际发育情况，这些研究成果在一定程度上佐证了前文的断层影响带发育规律及成因分析。

5 讨论

本文研究了北山地区新场地段的断层影响带发育规律和最大影响带宽度与断层长度的关系，并分析其地质力学成因。研究结果对我国高放废物北山预选区的岩体均质区划分、渗流特性和核素迁移规律研究均具有重要意义^[32-33]。因地质构造具有很强的区域性^[14, 34]，不同地区的构造应力场、地层厚度，岩性差异、地形地貌等条件不同，得到的断层影响带发育规律、宽度及其与断层长度之间的关系可能会有所不同，本文研究结果是基于地表地形起伏小、强度高、断层两盘及邻区岩性相对均一的硬脆性岩体。对强度较低、地区岩性差别较大的岩体，断层影响带大小和发育规律有待具体工程和大量的野外调查来检验，但通过节理特征反演断层的这种研究方法和思路可作一定参考。关于断层影响带最大宽度与断层长度之间的幂函数关系，从数学角度：幂函数是一个增函数，但考虑到自然界的实际情况，一条断层的延伸不可能无限长，断层对两侧岩体节理的影响范围也不会无限远。魏春光等^[35-37]的研究表明：断层一般呈断层带发育，即断层扩展至一定规模后，会在周围一定区域内发育若干条次一级断层，或者呈近似等间距发育近似平行的同级断层，以调节、转移这一地区的局部应力场分布格局，共同控制该地区的岩体稳定。因此可以推测，在某一地区，无论正断层、逆断层还是平移断层，断层长度均存在一个阈值，当断层延伸超过这某一阈值，断层进一步扩展，其断层影响带宽度将不再增大。且根据各类断层形成时的应力状态，很可能正断层的阈值较小，逆断层和平移断层的阈值相对较大。

6 结论

基于北山地区新场地段断层及其露头节理的现场调查，研究了断层影响带大小、发育规律以及断层影响带最大宽度与断层长度之间的关系，并分析其地质力学成因，得到以下主要结论：

(1) 在断层影响带内，随着露头与断层面的距离变远，节理中点面密度减小，平均迹长增加，当距断层距离超过断层影响带宽度 d_0 后，节理平均迹长和中点面密度的大小均在某一值附近波动，变化关系均可用负指数函数进行有效拟合。以此将断层影响带依次分为严重破坏区 I 和破坏区 II。断层类型不同，相近规模的断层两盘影响带宽度及发育规律差异明显，逆断层最大，平移断层次之，正断层最小；其中，正断层和逆断层两盘的影响带呈上盘宽、下盘窄的不对称分布，而平移断层近似呈对称分布。

(2) 断层影响带宽度 D 与断层长度 L 之间有较强的相关性，二者服从幂函数分布形式。根据地质断裂等间距规律推测：不同类型的断层均存在一个长度阈值 L_0 和对应的断层影响带宽度阈值 d_{\max} 。

(3) 决定断层影响带大小及分布规律的因素主要是岩性和形成断层时 σ_2 、 σ_2 和 σ_3 三个主应力轴的应力状态不同，致使断层形成时聚集在岩体内弹性应变能释放的难易程度存在明显差异：正断层在拉伸应力状态下有利于聚集在岩体中能量释放，而形成逆断层和平移断层的挤压应力状态不利于能量释放。此外，断层倾角、地层厚度和地形地貌等对断层影响带宽度也有一定影响。

断层影响带大小及发育规律，是进行结构面均质区划分和研究地下水分布的重要依据，根据节理平均迹长和中点面密度随距断层距离的变化规律，借此可反演该地区某地段是否存在断层，且有方便、快捷、易于操作者掌握等优点。鉴于断层影响带和断层破碎带内的岩体物理力学性质与正常围岩存在显著差异，研究结果对我国高放废物处置库设计、隧道工程穿过断层时的施工方案选择和支护设计等均具有重要的工程指导意义。

参考文献(References)：

- [1] 戴俊生, 张继标, 冯建伟, 等. 高邮凹陷真武断裂带西部低级序断层发育规律预测[J]. 地质力学学报, 2012, 18(1): 11-21. (DAI Junsheng, ZHANG Jibiao, FENG Jianwei, et al. Development law and

- prediction of the lower-order faults in the west of Zhenwu faults Gaoyou sag[J]. *Journal of Geomechanics*, 2012, 18(1): 11–21. (in Chinese))
- [2] 李生杰, 谢永利, 朱小明. 高速公路乌鞘岭隧道穿越 F4 断层破碎带涌水塌方工程对策研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(增 2): 3 602–3 609. (LI Shengjie, XIE Yongli, ZHU Xiaoming. Research on countermeasure of water gushing with collapse in process of Wushangling highway tunnel crossing F4 fault fracture zone[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(Supp.2): 3 602–3 609. (in Chinese))
- [3] 李晓昭, 张国永, 罗国焜. 地下工程中由控稳到控水的断裂屏障机制[J]. *岩土力学*, 2003, 24(2): 220–224. (LI Xiaozhao, ZHANG Guoyong, LUO Guoyu. Barrier effects caused by fault on excavating-induced stress and deformation and mechanism of resulting groundwater inrush[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(2): 220–224. (in Chinese))
- [4] 杨会军, 胡春林, 谟文武, 等. 断层及其破碎带隧道信息化施工[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(22): 3 917–3 922. (YANG Huijun, HU Chunlin, CHEN Wenwu, et al. Information construction of the tunnel in a fault and crush zone[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(22): 3 917–3 922. (in Chinese))
- [5] 张鹏程, 张连生, 邹和平, 等. 岩体节理到脆性断层的形成过程[J]. *中山大学学报: 自然科学版*, 2001, 40(3): 100–103. (ZHANG Pengcheng, ZHANG Liansheng, ZOU Heping, et al. The process of formation from joints rock mass to brittle faults[J]. *Acta Scientiarum Natralium Universities Sunyatseni*, 2001, 40(3): 100–103. (in Chinese))
- [6] 李月. 不同应力条件下断裂带结构发育特征探讨[J]. *中国煤炭地质*, 2013, 25(7): 5–7. (LI Yue. Discussion on faulted zone structural development characteristics under diverse stresses[J]. *Coal Geology of China*, 2013, 25(7): 5–7. (in Chinese))
- [7] 武红岭, 张利容. 断层周围的弹塑性区及其地质意义[J]. *地球学报*, 2002, 23(1): 11–16. (WU Hongling, ZHANG Lirong. The elastic-plastic region around faults and its geological significance[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2002, 23(1): 11–16. (in Chinese))
- [8] 周春华, 尹健民, 骆建宇, 等. 断层构造近场地应力分布规律研究[J]. *长江科学院院报*, 2012, 29(7): 57–61. (ZHOU Chunhua, YIN Jianmin, LUO Jianyu, et al. Law of geo-stress distribution in the vicinity of fault zone[J]. *Journal Yangtze River Scientific Research Institute*, 2012, 29(7): 57–61. (in Chinese))
- [9] 周小平, 张永兴, 郭映忠, 等. 共轭平移断层中各序次应力场和断裂等构造形迹相互关系的力学分析[J]. *工程地质学报*, 2001, 9(4): 373–376. (ZHOU Xiaoping, ZHANG Yongxing, GUO Yingzhong, et al. Mechanical analysis of mutual relation between different sequence stress field and fault structure trace in conjugate strike-slip fault[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2001, 9(4): 373–376. (in Chinese))
- [10] 武刚. 断层破碎带结构特征的露天模式[J]. *新疆石油天然气*, 2012, 8(4): 12–16. (WU Gang. Outcrop mode of structure feature on fault breakage zone[J]. *Xinjiang Oil and Gas*, 2012, 8(4): 12–16. (in Chinese))
- [11] 皇甫岗, 王晋南. 滇西北地区断层破碎带宽度与断层错距的统计关系[J]. *地震研究*, 1993, 16(4): 384–390. (HUANG Fugang, WANG Jinnan. Statistic relations between width of crack belt and dislocation distance of faults in north-west of Yunnan[J]. *Journal of Seismological Reserch*, 1993, 16(4): 384–390. (in Chinese))
- [12] 刘志刚, 刘秀峰. 断层参数预测法预报隧道断层[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(9): 1 547–1 550. (LIU Zhigang, LIU Xiufeng. Determination of tunnel fault by the method of fault parameter forecast[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(9): 1 547–1 550. (in Chinese))
- [13] 董进, 张世红, 姜勇彪. 正断层位移—长度关系及其研究意义[J]. *地质学前沿*, 2004, 11(4): 576–584. (DONG Jin, ZHANG Shihong, JIANG Yongbiao. The displacement-length relationship of faults and its significance[J]. *Earth Science Froniers*, 2004, 11(4): 576–584. (in Chinese))
- [14] 朱焕春, 陶振宇. 不同岩石中地应力分布[J]. *地震学报*, 1994, 16(1): 49–63. (ZHU Huanchun, TAO Zhenyu. Geostress distributions in different rocks[J]. *Acta Seismologic Sinica*, 1994, 16(1): 49–63. (in Chinese))
- [15] 王驹, 苏锐, 陈伟明, 等. 中国高放废物深地质处置[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(4): 649–658. (WANG Ju, SU Rui, CHEN Weiming, et al. Deep geological disposal of high-level radioactive wastes in China[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(4): 649–658. (in Chinese))
- [16] 陈伟明, 王驹, 赵宏刚, 等. 高放废物地质处置北山预选区新场地段地质特征[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(增 2): 4 000–4 006. (CHEN Weiming, WANG Ju, ZHAO Honggang, et al. Geological characters of Xinchang section in pre-selected Beishan region for high-level radioactive waste disposal[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(Supp.2): 4 000–4 006. (in Chinese))
- [17] 金远新, 闵茂中, 陈伟明, 等. 甘肃北山预选区新场地段花岗岩类岩石特征研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(增 2): 3 974–3 981. (JIN Yuanxin, MIN Manzhong, CHEN Weiming, et al. Study on granite characteristics of Xinchang section of candidate Beishan area, Gansu province[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(Supp.2): 3 974–3 981. (in Chinese))
- [18] 王峰, 苏刚, 晋佩东. 甘肃北山地区晚第四纪构造变形特征及演化趋势[J]. *地震研究*, 2004, 27(4): 173–178. (WANG Feng, SU Gang, JIN Peidong. Tectonic deformation and evolution trend of Beishan region, Gansu province since late quaternary[J]. *Journal of Seismological Research*, 2004, 27(4): 173–178. (in Chinese))
- [19] 甘肃省地质矿产局. 甘肃省岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997: 14–26. (Bureau of Geology and Mineral Resources of Gansu Province. *Rock and stratum of Gansu province*[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1997: 14–26. (in Chinese))
- [20] 李亚萍. 甘肃北山花岗岩裂隙几何学特征研究[硕士学位论文][D].

- 北京：中国地震局地质研究所，2005.(LI Yaping. Geometrical characteristics of fractures in granite in the Beishan area, Gansu province[M. S. Thesis][D]. Beijing：Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2005.(in Chinese))
- [21] 王峰,王驹,范洪海. 甘肃北山旧井地区晚第四纪活动断裂分布及其构造意义[J]. 地质论评, 2005, (3): 250–256.(WANG Feng, WANG Ju, FAN Honghai, et al. Distribution of late quaternary active faults and its tectonic significance in the Beishan region, Gansu province China[J]. Geological Review, 2005, (3): 250–256.(in Chinese))
- [22] 万天丰. 论构造地质学和大地构造学的几个重要问题[J]. 地学前缘, 2014, 21(1): 132–149.(WAN Tianfeng. Discussion on some important problems in structural geology tectonic[J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(1): 132–149.(in Chinese))
- [23] 杨春和,包宏涛,王贵宾,等. 岩体节理平均迹长和迹线中点面密度估计[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2 475–2 480.(YANG Chunhe, BAO Hongtao, WANG Guibin, et al. Estimation of mean trace length and trace midpoint density of rock mass joints[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(12): 2 475–2 480.(in Chinese))
- [24] 周友华,胡奉湘,燕为民,等. “三向应变结构”与地震孕育发生共同物理机制的研究[J]. 前沿科学, 2010, 4(14): 4–14.(ZHOU Youhua, HU Fengxiang, YAN Weimin, et al. Study on the common physical mechanism of the triaxial strain structure and earthquake preparation[J]. Frontier Science, 2010, 4(14): 4–14.(in Chinese))
- [25] 朱小明,宋宏伟,刘辉. 岩石中爆炸应力波衰减规律[J]. 山西建筑, 2007, 33(31): 112–113.(ZHU Xiaoming, SONG Hongwei, LIU Hui. The attenuation regular of blasting stress wave in rocks[J]. Shanxi Architecture, 2007, 33(31): 112–113.(in Chinese))
- [26] 徐平,王宝善,张尉,等. 利用互相关函数求地震波衰减[J]. 地球物理学报, 2006, 49(6): 1 738–1 744.(XU Ping, WANG Baoshan, ZHANG Wei, et al. Estimating seismic attenuation using cross-correlation function[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(6): 1 738–1 744.(in Chinese))
- [27] 李洪涛,卢文波,舒大强,等. 爆破地震波的能量衰减规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增 1): 3 364–3 369.(LI Hongtao, LU Wenbo, SHU Daqiang, et al. Study of energy attenuation law of blast-induced seismic[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Supp.1): 3 364–3 369.(in Chinese))
- [28] 谢和平,鞠杨,黎立云,等. 岩体变形破坏过程的能量机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1 729–1 740.(XIE Heping, JU Yang, LI Liyun, et al. Energy mechanism of deformation and failure of rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(9): 1 729–1 740.(in Chinese))
- [29] 沈国华. 有限元数值模拟方法在构造裂缝预测中的应用[J]. 油气地质与采收率, 2008, (4): 24–26.(SHEN Guohua. Application of the finite element numerical simulation method in fracture prediction[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2008, (4): 24–26.(in Chinese))
- [30] 宋永东,戴俊生. 储层构造裂缝预测研究[J]. 油气地质与采收率, 2007, (6): 9–13.(SONG Yongdong, DAI Junsheng. Research on the forecast of reservoir structural fractures[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2007, (6): 9–13.(in Chinese))
- [31] 文世鹏,李德同. 储层构造裂缝数值模拟技术[J]. 石油大学学报, 1996, (5): 17–24.(WEN Shipeng, LI Detong. Numerical simulation technology for structural fracture of reservion[J]. Journal of the University of Petroleum, 1996, (5): 17–24.(in Chinese))
- [32] 罗嗣海,钱七虎,李金轩,等. 高放废物深地质处置中的多场耦合与核素迁移[J]. 岩土力学, 2005, 26(增): 264–270.(LUO Sihai, QIAN Qihu, LI Jinxuan, et al. Multi-field coupling and nuclide transport in h/w geological disposal repository[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(Supp.): 264–270.(in Chinese))
- [33] 杨春和,王贵宾,王驹,等. 甘肃北山预选区岩体力学与渗流特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(4): 825–832.(YANG Chunhuo, WANG Guibin, WANG Ju, et al. Study on rock mass mechanics and seepage characteristics of candidate site-Beishan, Gansu province[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(4): 825–832.(in Chinese))
- [34] 王思敬. 论岩石的地质本质性及其岩石力学演绎[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(3): 433–450.(WANG Sijing. Geological nature of rock and its deduction for rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(3): 433–450.(in Chinese))
- [35] 魏春光,周建勋,何雨丹. 岩石强度对冲断层形成特征影响的砂箱实验研究[J]. 地学前缘, 2004, 11(4): 559–565.(WEI Chunguang, ZHOU Jianxun, HE Yudan. Experimental study with sandbox of the influence of rock's intensity on formation of thrusts[J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(4): 559–565.(in Chinese))
- [36] 付晓龙,戴俊生,张宏国. 汉润斜坡带阜宁期应力场数值模拟及低级序断层发育规律预测[J]. 地质力学学报, 2013, 19(2): 125–132.(FU Xiaolong, DAI Junsheng, ZHANG Hongguo. Numerical simulation of structural stress field in funing sedimentary period and prediction of the development law of lower-order faults in Chajian slope zone[J]. Journal of Geomechanics, 2013, 19(2): 125–132.(in Chinese))
- [37] 宋义敏. 地质体裂隙等间距性的理论研究[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2007, (4): 527–528.(SONG Yimin. Study on spacing between fractures in a group[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2007, (4): 527–528.(in Chinese))