



您可能感兴趣的文章、专题：

盘点《煤炭学报》2020年热点论文

《煤炭学报》2021年第1期

“新锐科学家”专题

“深部岩体力学与开采理论”专题

“煤加工与洁净化工技术”专题

“黄河流域矿区生态保护与可持续发展”专题

“煤矿热动力灾害防控技术与装备”专题

“煤矿快速智能掘进理论与技术”专题

“煤系天然气聚集理论与勘探开发技术”专题

“低品质煤浮选过程强化”专题

深部不同深度岩石脆延转化力学行为研究

谢和平^{1,2,3,4,5}, 高明忠^{1,2,3,4,5}, 付成行⁵, 鲁义强^{5,6}, 杨明庆⁵, 胡建军⁵, 杨本高⁵

(1. 深圳大学 广东省深地科学与地热能开发利用重点实验室, 广东 深圳 518060; 2. 深圳大学 深地科学与绿色能源研究院, 广东 深圳 518060; 3. 深圳大学 土木与交通工程学院, 广东 深圳 518060; 4. 深圳大学 深圳市深部工程科学与绿色能源重点实验室, 广东 深圳 518060; 5. 四川大学 水利水电学院, 四川 成都 610065; 6. 中铁工程装备集团有限公司, 河南 郑州 450000)

摘要: 岩石脆延转化力学行为规律是深部岩石力学研究的重要内容之一, 同时也是影响深地工程安全高效实施的关键因素。为研究深部不同深度岩石脆延转化力学行为差异性规律, 以松辽盆地 1 000 ~ 6 400 m 不同赋存深度的砂岩、砾岩和安山岩为研究对象, 开展了同一深度岩石不同应力水平下、不同深度岩石同一应力水平下以及不同深度岩石原位应力水平下的常规三轴实验, 并采用峰前和峰后脆性指标分析了岩石的脆性特征, 初步揭示了深部不同深度岩石脆延转化力学行为的关键影响因素与差异性规律。研究表明: 不同深度岩石脆延转化并非是瞬时的, 而是存在一个脆延性逐渐转换的应力区间。同一深度岩石不同应力水平下其脆延特征主要受围压影响。对于 1 600 m 深砂岩, 其脆性整体上随着围压的增大而减小, 出现了从脆性—延性—应变硬化的转变, 并且其峰后塑性逐渐增强, 直到峰后呈现完全塑性。50 ~ 70 MPa 应力水平范围为 1 600 m 深砂岩的脆延转化区间; 相同围压下不同深度岩石的脆延特征主要受其本身矿物组分的影响。对于松辽盆地岩石样品, 其硬相矿物和中等相矿物的含量总体上随着深度的增加而增大, 导致其脆性随深度的增加而增大, 由浅至深表现出延性—脆延转化—脆性的特征; 不同深度岩石原位应力水平下其峰后特征随着深度的增加呈现出不同的特征: 1 000 ~ 3 500 m 深砂岩表现出峰后应变软化特征, 4 800 m 深砂岩和 5 100 ~ 5 600 m 深砾岩表现出峰后脆性特征, 6 400 m 以深的安山岩表现出峰后塑性流动特征。岩石的脆延特征受诸多因素的影响, 其中岩石的矿物组分和应力环境对其脆延特征的影响存在博弈现象。随着深度的增加硬相矿物和中等相矿物含量的增加会导致岩石的脆性增长, 而岩石加载应力水平的增加, 又会抑制岩石的脆性增长。

关键词: 深部岩石; 不同深度岩石; 脆延性转化; 脆性指标; 原位应力环境

中图分类号: TD313

文献标志码: A

文章编号: 0253-9993(2021)03-0701-15

Mechanical behavior of brittle-ductile transition in rocks at different depths

XIE Heping^{1,2,3,4,5}, GAO Mingzhong^{1,2,3,4,5}, FU Chenghang⁵, LU Yiqiang^{5,6}, YANG Mingqing⁵,
HU Jianjun⁵, YANG Bengao⁵

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Deep Earth Sciences and Geothermal Energy Exploitation and Utilization, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 2. Institute of Deep Earth Sciences and Green Energy, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 3. College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 4. Shenzhen Key Laboratory of Deep Underground Engineering Sciences and Green Energy, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 5. College of Water Resource & Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 6. China Railway Engineering Equipment Group Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China)

收稿日期: 2021-01-23 修回日期: 2021-03-01 责任编辑: 常琛 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.YT21.0157
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51827901, U2013603); 广东省珠江人才计划引进创新创业团队计划资助项目(2019ZT08G315)

作者简介: 谢和平(1956—), 男, 湖南双峰人, 中国工程院院士。E-mail: xiehp@szu.edu.cn

引用格式: 谢和平, 高明忠, 付成行, 等. 深部不同深度岩石脆延转化力学行为研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 701-715.

XIE Heping, GAO Mingzhong, FU Chenghang, et al. Mechanical behavior of brittle-ductile transition in rocks at different depths[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 701-715.



移动阅读

Abstract: The mechanical behavior of brittle-ductile transition in rocks is one of the essential components of deep rock mechanics, as well as a key factor that impacts the safe and efficient implementation of deep rock engineering projects. To study the differences in the mechanical behaviors of brittle-ductile transition in deep rocks, the sandstones, conglomerates and andesites at different occurrence depths (1 000–6 400 m) from the Songliao Basin are taken as research objects, and a number of conventional triaxial tests are carried out on rocks at an identical depth but under different stress levels, rocks at different depths but under an identical stress level, and rocks under different stress levels and at different depths. The brittleness characteristics of rocks are analyzed by using the pre-peak and the post-peak brittleness index. A preliminary understanding of the key influencing factors and differences in the mechanical behaviors of brittle-ductile transition in deep rocks at different depths has been achieved. The research results show that rather than an instantaneous brittle-ductile transition in rocks at different depths, a stress zone exists in progressive transition from brittleness to ductility. The brittleness of rocks at an identical depth but under different stress levels are mainly affected by the confining pressure. For sandstones at a depth of 1 600 m, its brittleness generally decreases with the increase of confining pressure, and there is a transition from its brittleness, ductility to strain hardening, its post-peak plasticity gradually increases until it shows a complete plasticity after the peak. The stress level range of 50 MPa to 70 MPa is the brittle-ductile transition zone of sandstones at the depth of 1 600 m. The brittle ductility characteristics of rocks at different depths under the same confining pressure are mainly affected by their own mineral components. For the rock samples from the Songliao Basin, their content of hard phase minerals and middle phase minerals generally increase with the increase of depths, which causes their brittleness to go up with depth increases, exhibiting a shallow to deep characteristic of transition from brittleness to ductility to brittleness. The post-peak characteristics of in-situ rock stress levels at different depths show different characteristics as the depth increases; the sandstones at depths from 1 000 m to 3 500 m depth show post-peak straining softening, post peak brittleness is found in sandstones at the depth of 4 800 m and conglomerates from depths at 5 100 m to 5 600 m, while the andesites at the depth of 6 400 m manifest the characteristic of post-peak plastic flow. Many factors affect the brittleness and ductility of rocks. Among them, game phenomenon exists in the impact on the brittleness and ductility of rocks between the mineral composition and stress environment. As the depth increases, the increase of hard phase minerals and middle phase minerals will cause the brittleness to increase, and the increase in the loading stress level will inhibit the brittleness of the rocks. The research results are expected to guide the scientific explorations and efficient implementation of the deep rock engineering.

Key words: deep rocks; rocks at different depths; brittle-ductile transition; brittleness index; in-situ stress environment

向地球深部要空间、要资源是大势所趋,地球深部资源的开发与利用已成为世界各国争先探索的科学制高点,其共性科学基础即是深部岩石力学理论^[1-6]。随着能源资源开发由浅部走向深部,深部工程中的“高地应力、高温、高渗透压”的“三高”地质环境导致岩石的组织结构、基本力学特征和工程响应发生变化,均是深部工程灾害频发且不同于浅部灾害形式的主要原因^[7-17]。不同赋存深度岩石力学行为的差异性主要体现在岩石变形、强度特征、破坏特征和脆延性转化等方面^[18-21],其中,岩石的脆延性随深度的演化规律是深部岩石力学研究的重要内容之一。

由于不同深度岩芯难以获取,大多学者仍通过改变围压来近似模拟不同深度的地应力赋存环境,进而分析岩石脆延性状态转化方面的规律,并发现随着围压的增大岩石具有从脆性向延性转化的趋势^[22-24]。笔者首创深部岩石原位保真取芯技术,旨在探索研究

原位环境下深部岩石的物理力学差异性特征新规律、构建深部原位岩石力学新理论体系^[25-26]。VON KARMAN用大理岩进行不同围压条件下的力学实验^[27],发现在围压约69 MPa下,大理岩发生了较大的塑性变形,轴向应变的值达到8%左右时试样还未发生宏观破坏。PATERSON^[28]在室温下对Wombegan大理岩做了试验,发现大理岩的围压超过20 MPa后峰值应变显著增加,并且随着围压的增大岩石的力学性质有脆性向延性转变的特性,PATERSON把这种由低峰值应变下的宏观破裂到峰值应变下的没有明显破坏迹象的转变称脆延转变。MARTIN和STIMPSON^[29]基于大量实验,总结出了一个基于应力和强度关系的脆延转化条件。HANDIN^[30]对盐岩在室温下的三轴压缩试验中观测到围压小于20 MPa时会发生脆性向延性转变。MOGI^[31]采用大理岩进行实验得出了类似的结果。CLEARY^[32]认为岩石的破坏过程在浅部表现为脆

性或断裂韧性控制,在深部表现为准静态或延性状态。周宏伟等^[33]从微细观角度讨论了岩石内部微结构在脆延转变过程中的作用,认为外部因素为温度和压力,内部因素为内部晶体的微结构,深部岩石脆延转变受到这两类因素共同作用,且它们相互影响。尽管众多学者对深部岩石的脆延转换问题做了大量研究,但大多仍采用通过改变围压来近似模拟不同深度的地应力赋存环境,且多数还集中在定性的讨论阶段^[34-35]。

对岩石这种多孔介质来讲,孔隙度对岩石的脆延性转变也有关键控制作用。脆性和延性之间的区别是宏观的,这取决于岩石是否能够承受较大的永久应变而没有宏观的断裂^[36]。与岩石的宏观脆性断裂相关的变形机制主要包括晶粒间的微裂纹扩展和摩擦滑动,岩石在延性状态下的非弹性变形机制主要包括晶体可塑性、晶体的转移和分解^[36-38]。学者普遍认为,多孔岩石脆延性的转变与初始孔隙度密切相关^[36]。而 BRACE^[39]认为当岩石的孔隙度 $<5\%$ 时,可将其视为少孔岩石,反之则可视为多孔岩石,并将 5% 这一临界值作为区分少孔岩石和多孔岩石的指标,称为截止孔隙度。基于此,BAUD 等^[40]研究了 Solnhofen 石灰岩脆延性的变化,将截止孔隙度临界值降低至 3% 。BAUD 等发现以往关于多孔砂岩脆延性转变的概念过于简单化,岩石的脆延性转变过程可能存在一种中间状态,其破坏模式与压实带的局部发展有关^[41-44]。

以上学者主要以 $1\ 000\text{ m}$ 以浅的岩石为研究对象,很少考虑深度变化导致的岩石性质的改变,以不同围压模拟深度的变化,导致利用浅部岩石获得的规律不能适用于深部岩石。HERRMANN 等^[45]研究发现露头页岩和深部页岩的力学性质差异较大,这也验证了采用浅部岩石通过改变围压去模拟深部岩石的力学性质会与深部岩石的真实力学性质存在较大的差异。因此,研究不同深度岩石力学性质的变化,有必要同时考虑不同深度岩石本身的差异性和不同深度环境应力水平的差异性。笔者以松辽盆地 $1\ 000\sim 6\ 400\text{ m}$ 深度岩石为研究对象,充分考虑岩石原位应力环境以及初始物性差异,初步探究了不同深度岩石脆延转化力学行为特征。

1 基于松科二井原位岩芯的不同深度岩石三轴力学实验

1.1 松科二井不同深度试样制备

松辽盆地作为中国陆相沉积地层最完整的区域,是研究不同深度岩石物理力学行为差异的最佳靶点。特别是松辽盆地有中国最深(完井深度 $7\ 018\text{ m}$)的科探钻井——松科二井,可以获得用以科学探索的深

部岩芯,本研究所取岩芯主要集中在 $4\ 800,5\ 100,5\ 600,6\ 400\text{ m}$ 深度范围。为了系统的研究松辽盆地不同赋存深度岩石的物理力学规律,建立大深度范围的不同赋存深度规律研究,课题组在大庆油田取芯井(龙17、龙10-08、葡深1、台602、茂61-检89、大424)获得的 $1\ 000\sim 3\ 500\text{ m}$ 深部范围内的岩芯,综合松科二井样品开展不同深度岩石的物理力学试验。大庆油田取芯井与松科科探钻井的相对位置如图1所示^[46],两者均位于松辽盆地,且地质条件相似,故在一定程度上可将两者岩芯统一进行研究。

实验采用10个深度的岩芯,赋存深度分别为 $1\ 000,1\ 300,1\ 600,1\ 850,2\ 600,3\ 500,4\ 800,5\ 100,5\ 600,6\ 400\text{ m}$ 。其中 $1\ 000\sim 4\ 800\text{ m}$ 为砂岩, $5\ 100\sim 5\ 600\text{ m}$ 为砾岩, $6\ 400\text{ m}$ 为安山岩。将取得的岩芯制作成直径为 $(25\pm 1)\text{ mm}$,高径比为 (2 ± 0.2) 的圆柱体试样,试样两端面不平行度应不大于 0.01 mm ;试样上下端直径偏差不应大于 0.1 mm ;试件表面应光滑,避免因不规则表面而产生的应力集中现象导致试验数据失真。

1.2 实验设备及试验方案设计

本文考虑深度影响的岩石常规三轴力学实验中, $1\ 000\sim 3\ 500\text{ m}$ 深度实验在四川大学 MTS815 岩石力学实验机上开展; $4\ 800\sim 6\ 400\text{ m}$ 深度在重庆大学 GCTS 高温高压岩石力学实验机上开展。实验前采用标准铝块和完整砂岩验证了2台实验机在测试中的误差,确保实验机在测试中产生的误差可以忽略。

为深入探索不同深度岩石脆延转化力学行为规律,共设计3个试验方案:①同一深度(Same depth)岩石不同应力水平(Different stress)的常规三轴实验,简称SD;②不同深度(Different depth)岩石同一应力水平(Same stress)的常规三轴实验,简称DS;③不同深度(Different depth)岩石真实应力水平(True stress)的常规三轴实验,简称DT。实验参数见表1。

2 不同深度岩石脆延特性评价方法

为了深入研究不同深度岩石的力学特性,充分分析松辽盆地不同深度岩石三轴压缩下脆延性特征差异,采用 MOGI^[47]和 RYBACKI E 等^[48-49]提出的定义典型应力-应变曲线几个特征力学参数的方法进行表征,如图2所示。

图2中A点为应力应变曲线的屈服点;B点为峰值应力点(试样破坏点);OD代表试样的延展性(延性),定义为材料在无断裂情况下经受最大永久变形的能力。目前关于延性参数度量方法没有统一,本文给出了一个简单的确定方法,从应力应变曲线的起始

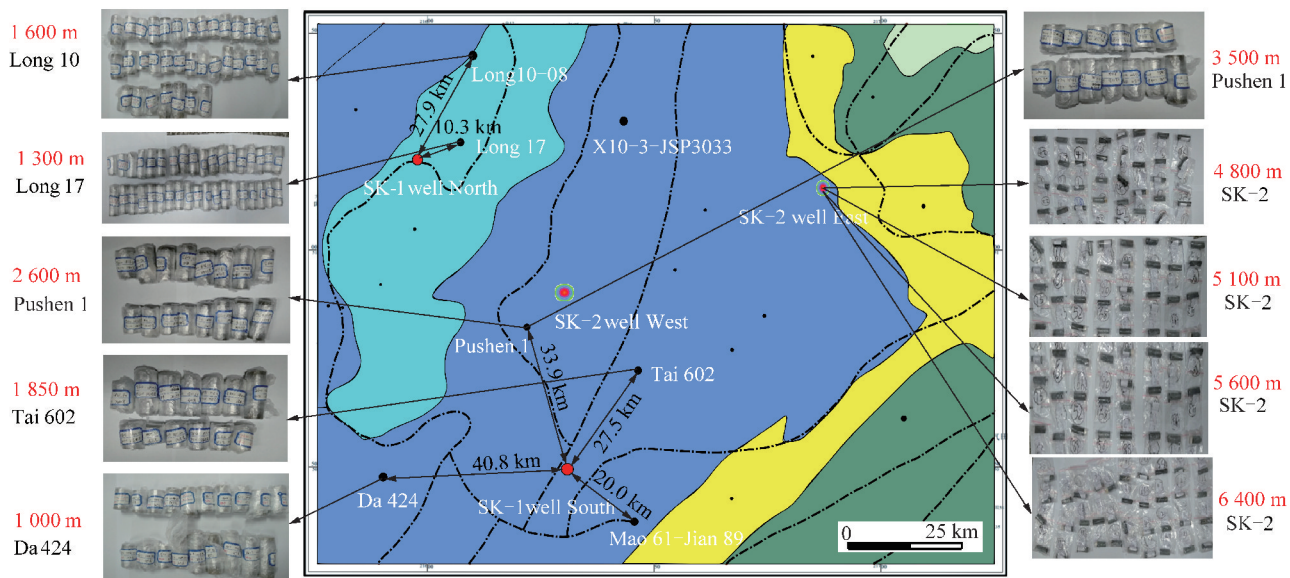
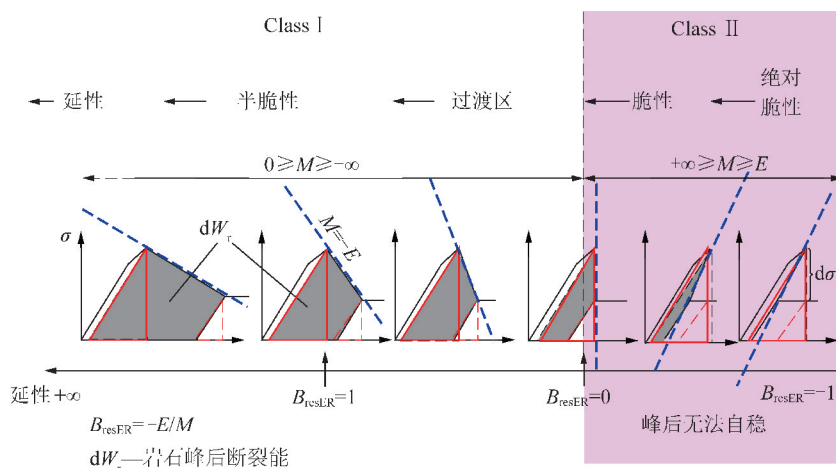
图1 松辽盆地取芯位置^[46]Fig. 1 Location of cores obtained^[46]

表1 不同深度试验样品信息

Table 1 Sample information at different depths

方案	取样深度/m	加载应力水平/MPa			加载围压/MPa	实验模拟深度/m
		垂直主应力 σ_v	最大水平主应力 σ_H	最小水平主应力 σ_h		
① 同一深度岩石 不同应力水平	1 600	16.76	21.7	13.74	13.74	1 000
		26.96	29.5	20.94	20.94	1 300
		37.16	37.3	28.14	28.14	1 600
		45.66	43.8	34.14	34.14	1 850
		71.16	63.3	52.14	52.14	2 600
		101.76	86.7	73.74	73.74	3 500
		145.96	120.5	104.94	104.94	4 800
		156.16	128.3	112.14	112.14	5 100
② 不同深度岩石 同一应力水平	1 000	16.76	21.7	13.74	52.14	2 600
	1 300	26.96	29.5	20.94	52.14	2 600
	1 600	37.16	37.3	28.14	52.14	2 600
	1 850	45.66	43.8	34.14	52.14	2 600
	2 600	71.16	63.3	52.14	52.14	2 600
	3 500	101.76	86.7	73.74	52.14	2 600
	4 800	145.96	120.5	104.94	52.14	2 600
	5 100	156.16	128.3	112.14	52.14	2 600
③ 不同深度岩石 原位应力水平	1 000	16.76	21.7	13.74	13.74	1 000
	1 300	26.96	29.5	20.94	20.94	1 300
	1 600	37.16	37.3	28.14	28.14	1 600
	1 850	45.66	43.8	34.14	34.14	1 850
	2 600	71.16	63.3	52.14	52.14	2 600
	3 500	101.76	86.7	73.74	73.74	3 500
	4 800	145.96	120.5	104.94	104.94	4 800
	5 100	156.16	128.3	112.14	112.14	5 100

图 3 岩石峰后脆性变化趋势示意^[52]Fig. 3 Schematic diagram of the trend of brittleness after the peak^[52]

3 同一深度岩石不同应力水平下脆延差异性特征分析

赋存深度的变化会导致初始应力水平的改变,而岩石所处的初始应力水平对其力学性质具有显著的影响。岩石材料在较低初始应力水平下往往呈现出脆性破坏特征,而在高应力水平下表现出逐渐向延性过渡的破坏特征,其强度随应力

水平变化规律也会表现出非线性^[24,28-31]。因此本节从不同深度岩石所处的应力环境入手,研究围压对单一深度岩石力学性质的影响,揭示不同初始应力水平对岩石弹性模量、泊松比、强度、脆延性转变等方面的影响。实验以 1 600 m 深度的砂岩为研究对象,其不同围压下的实际破坏形态如图 4 所示,岩石受压主破裂面示意如图 5 所示,偏应力-应变曲线如图 6 所示。

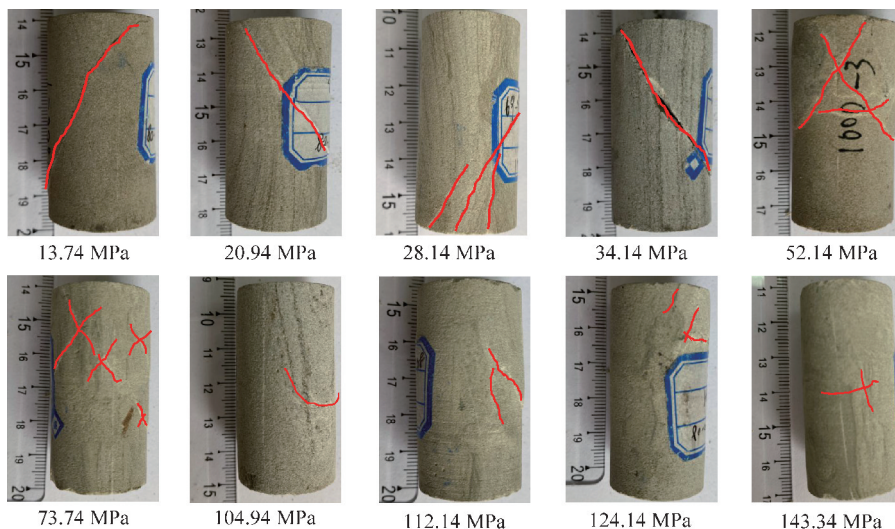


图 4 1 600 m 深度岩石在不同围压下的破坏形态

Fig. 4 Failure mode of rock at 1 600 m depth under different confining pressure

由图 4,5 可知,1 600 m 深砂岩在三轴应力作用下其破坏形态随着围压的增大经历了低围压下的单剪破坏、较高围压下的双剪破坏以及高围压下的无明显裂纹面的涨鼓破坏 3 个阶段。低围压下的单剪破坏;围压在 13.74 ~ 34.14 MPa 时,1 600 m 深砂岩的破坏形式为典型的单剪破坏。当试样达到屈服应力后,试样的承载能力会较快达到峰值,并开始下降。在围压较小的三轴应力作用下,由于受到侧向应力对

裂纹张拉发展的抑制,岩石的破坏过程沿着主破裂面法线方向发生偏转,剪切面法线方向并不总沿着最小主应力方向。试样微观上以沿晶破坏为主,穿晶破坏为辅,晶体没有产生大量的塑性变形从而形成单剪破坏面。较高围压下表现为典型双剪破坏;当围压升高至 52.14 ~ 73.74 MPa 时,岩石破坏形式表现为双剪破坏。产生这种现象的原因是在该围压范围内,试样达到屈服点后其承载能力不会很快达到峰值,会产生

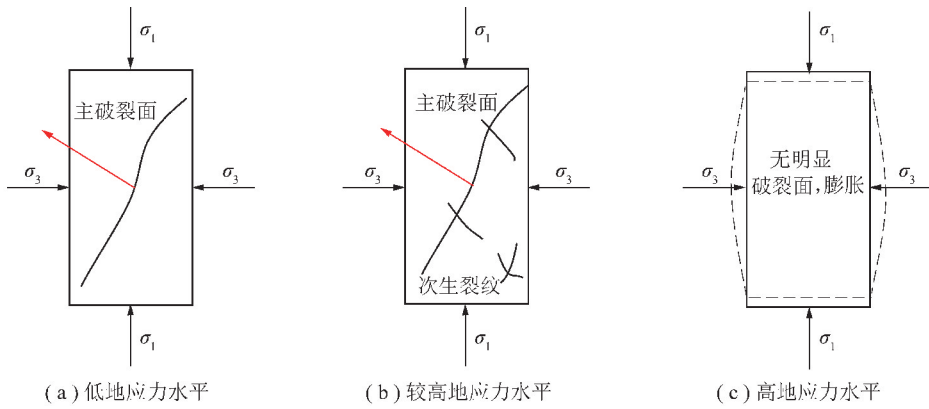


图5 岩石受压主破裂面示意

Fig. 5 Schematic diagram of the main fracture surface of rock under pressure

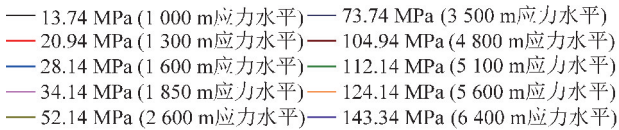
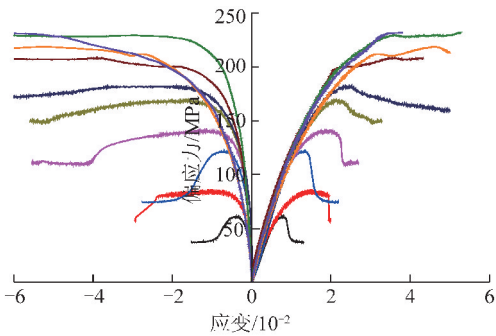


图6 不同围压下1600 m深度砂岩的偏应力-应变曲线

Fig. 6 Deviatoric stress-strain curves of sandstone at a depth of 1600 m under different confining pressures

一定的塑性变形,之后试样承载能力下降也较为缓慢。由于围压的增大,试样的破坏过程产生大量的穿晶破坏,并且部分晶粒发生错位滑移和塑性变形进而产生双剪破坏。高围压下则在宏观上无明显裂纹面的胀鼓破坏;岩石受高围压作用时,特别是围压大于其单轴抗压强度时,沿最大能量释放率发生方向的弹性应变能小于剪切破坏能量,进而发生膨胀破坏。试样达到屈服点之后进一步产生应变需要更大的应力,产生硬化现象,并在此过程中产生大量的永久变形。试样在微观上以晶粒的塑性变形和错位滑移为主,导致试样产生中部胀鼓的延性破坏特征^[53]。

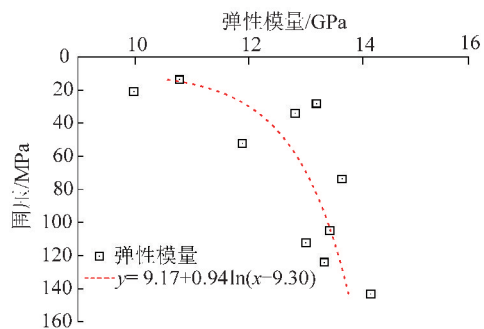
由图6中的偏应力-应变曲线可以直接观察到:破坏前岩石的峰值应变随着围压的增大而增大;另外,随着围压的增大,岩石的塑性也不断的增大,具有脆性逐渐向延性转化的趋势。当围压在13.74~34.14 MPa时,1600 m深度砂岩偏应力-应变曲线经历了标准的裂隙压密阶段、线弹性变形阶段、裂纹起裂和稳定扩展阶段、裂隙非稳定发展阶段、残余强度

阶段5个阶段。并且随着围压的增大,岩石峰后的塑性越来越强,但是试样整体上有一个峰值强度,破坏后承载迅速下降,表现出一定的脆性特征;当围压升高至52.14~73.74 MPa时,岩石显示出由脆性至延性的转化过渡状态;当围压升高至104.94 MPa时,岩石呈现塑性流动状态,表现出延性特征;当围压升高至143.34 MPa时,试样的偏应力随着围压的增大稳定增长,出现应变硬化的现象。上述结果表明对于1600 m深度的砂岩,岩石脆延转化并非一个定值,而是存在一个脆延性逐渐转换的应力区间。对于1600 m深度砂岩,围压在50~70 MPa为其脆延性转化区间,并且在围压为13.74~143.34 MPa范围内,随着围压的增大,岩石的性质出现了从脆性—延性—应变硬化的转变。

根据松辽盆地1600 m深度砂岩的应力-应变关系,采用前文提出的不同深度岩石脆延特性评价计算方法,得到其在不同初始应力水平下的典型力学参数,如图7所示。在这里需要注意的是,试样在104.94~143.34 MPa围压下表现出很强的延性特征,所以没有残余强度 σ_{res} 和相对应的应变 ε_{res} ,因此在计算峰后跌落模量 M 时, $M=0, B_{resER} = +\infty$ 。

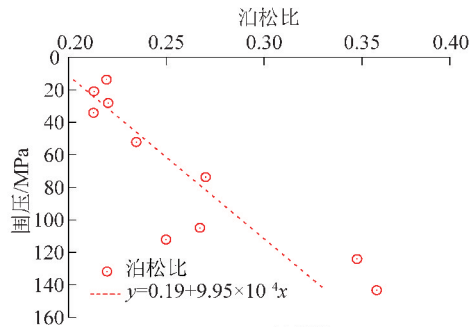
由图7可知,1600 m深度砂岩的弹性模量随着初始应力水平的增大略有提高,但整体上升幅度不大(图7(a)),围压增大对弹性模量的影响有限。但1600 m深度砂岩的泊松比随着初始应力水平的增大而呈现增大趋势(图7(b)),表明随着初始应力水平的增大,岩石的塑性逐渐增大。1600 m深度砂岩的三轴相对强度随着初始应力水平的变化呈现明显的对数增长趋势(图7(c)),也即随着围压的升高,三轴相对强度的增长趋势逐渐减弱并趋近于0。残余强度随着深度增大也逐渐增大,围压超过100 MPa后,1600 m深度岩石的残余强度与峰值强度基本相等(图7(c))。应变硬化模量随着围压的增大规律性不强(图7(d))。

但峰后跌落模量随着深度的增大呈现急剧减小趋势。围压超过 100 MPa 后峰后跌落模量的值趋近于 0, 岩石峰后表现出塑性流动特征(图 7(e))。

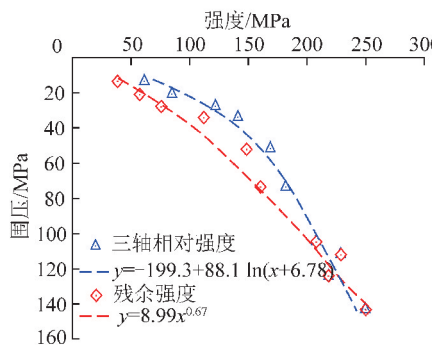


(a) 弹性模量

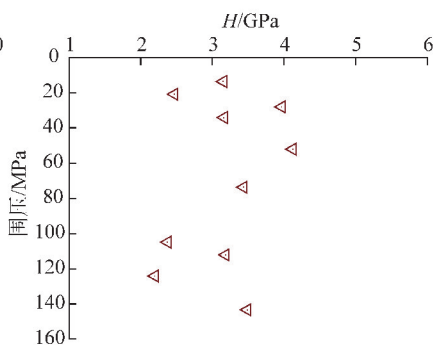
为了研究围压变化对岩石的弹塑性特征的影响, 将 1 600 m 深度砂岩不同围压下的几种脆性指标的变化趋势绘于图 8 中。



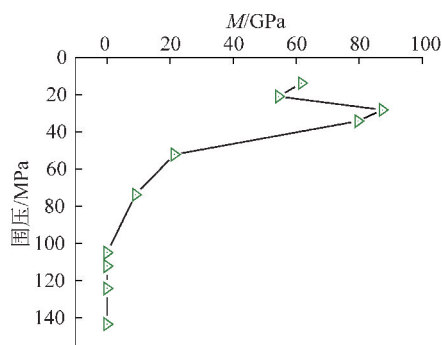
(b) 泊松比



(c) 三轴相对强度和残余强度



(d) 应变硬化模量



(e) 跌落模量

图 7 1 600 m 深度砂岩在不同围压下的三轴力学参数

Fig. 7 Triaxial mechanical parameters of sandstone at a depth of 1 600 m under different confining pressures

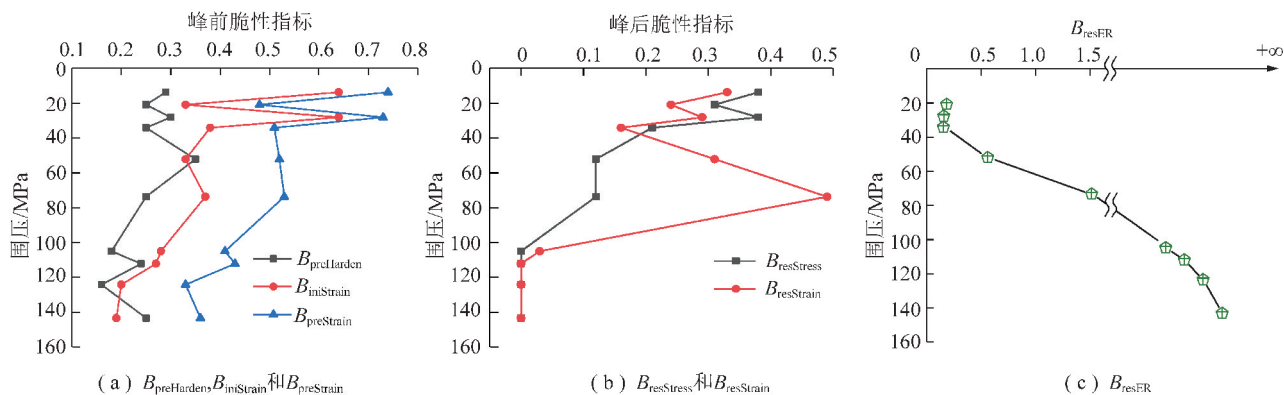


图 8 1 600 m 深度岩石在不同围压下脆性评价指标随围压的变化规律

Fig. 8 Variation of brittleness evaluation index with confining pressure for 1 600 m deep rock under different confining pressures

由图 8(a)可知,1 600 m 深度砂岩的峰前脆性指标总体上都是随着围压的增大的而减小。由图 8(a)可以看出,随着围压的增大,岩石的非弹性段所占的比例逐渐增大;由图 8(b),(c)可以看出 1 600 m 深砂岩峰后脆性指标 $B_{resStress}$ 和 $B_{resStrain}$ 随着围压的增大而减小, B_{resER} 随着围压的增大而增大, 这都表明岩石的峰后塑性随围压的增大逐渐增强,直到峰后表现为完全塑性。对于单一深度的岩石,其矿物组分是一致的,这种情况下围压是影响其脆性特征的主导因素,随着围压的增大,岩石的脆性会逐渐减弱。

4 不同深度岩石同一应力水平下脆延差异性特征分析

岩石的力学性质受诸多因素的影响,如岩石物性、组分、围压、温度、含水率等。其中岩石物性对岩石的物理力学行为会产生重要的影响,是起主导作用的关键因素之一。通常岩石在漫长的地质作用下,其组分和矿物成分复杂。分析哪些矿物组分是影响岩石力学参数差异及脆延性转化的主要矿物是研究不同深度岩石力学性质差异性的重要内容之一。本节

着重研究不同深度岩石在仅考虑岩石物性差异时其力学行为的变化。

从上文单一深度岩石不同围压下的脆延性分析可以看出,围压对岩石的脆延性转化有着直接的影响,并且1 600 m深度砂岩在50~70 MPa处于脆延转化状态。本节在研究岩石物性对岩石力学性质影响时,采用该临界范围的围压52.14 MPa(对应于2 600 m深度的初始应力水平),研究不同深度岩石的岩石物性对力学性质的影响,得到偏应力-应变曲线随赋存深度的变化趋势如图9所示。

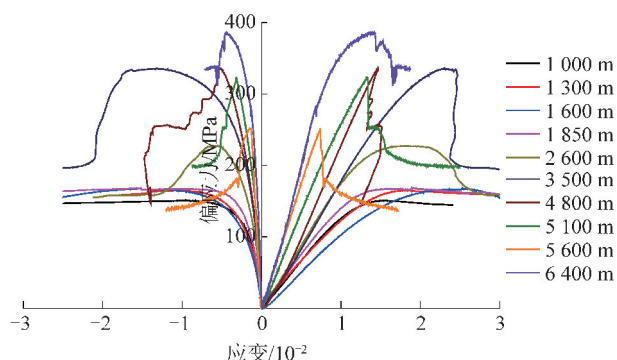


图9 不同深度岩石在52.14 MPa围压下的偏应力-应变曲线

Fig. 9 Stress-strain curves of rocks at different depths under 52.14 MPa confining pressure

由图9可以直接的观察到:在同一围压下不同深度岩石的峰值偏应力随着深度的增大呈现增大趋势;另外随着深度的增加岩石的脆性不断增强,延性

不断减弱。具体随深度的变化过程为:浅部岩芯(1 000~1 850 m砂岩)在达到峰值荷载之后基本呈现弹塑性流动状态,表现出很强的延性特征;2 600 m砂岩岩芯在保持一段塑性变形之后应力水平才逐渐降低,然后进入稳定变形阶段;深部岩芯(3 500~4 800 m砂岩、5 100~6 400 m砾岩以及6 400 m安山岩)在达到峰值荷载之后应力水平迅速下降,表现出脆性特征。表明在52.14 MPa的相同围压下,不同深度岩石的力学性质受其自身矿物组分的影响,岩石由浅至深表现出延性-脆延转化-脆性的特征,其主要原因为随着深度的增大,中等相和硬相矿物含量的增加导致的。

同一围压(52.14 MPa)下不同深度岩石的三轴力学参数随深度的变化趋势如图10所示。由图10可知,在同一围压(52.14 MPa)下,不同深度砂岩和砾岩的弹性模量均随着深度的增大呈现增大趋势(图10(a));泊松比随着深度的变化离散性较大,但总体上呈现减小趋势(图10(b));不同深度下砂岩的三轴相对强度和残余强度基本上随着深度的增大而增大,而砾岩则相反(图10(c));不同深度岩石的应变硬化模量随着深度的增大呈现增大趋势(图10(d));峰后跌落模量随着深度的增大变化趋势差异较大(图10(e)),在1 000~1 850 m深度范围内的砂岩峰后跌落很小,表明该范围内岩石的峰后处于延性阶段。在2 600 m深砂岩的峰后模量略有增大,表

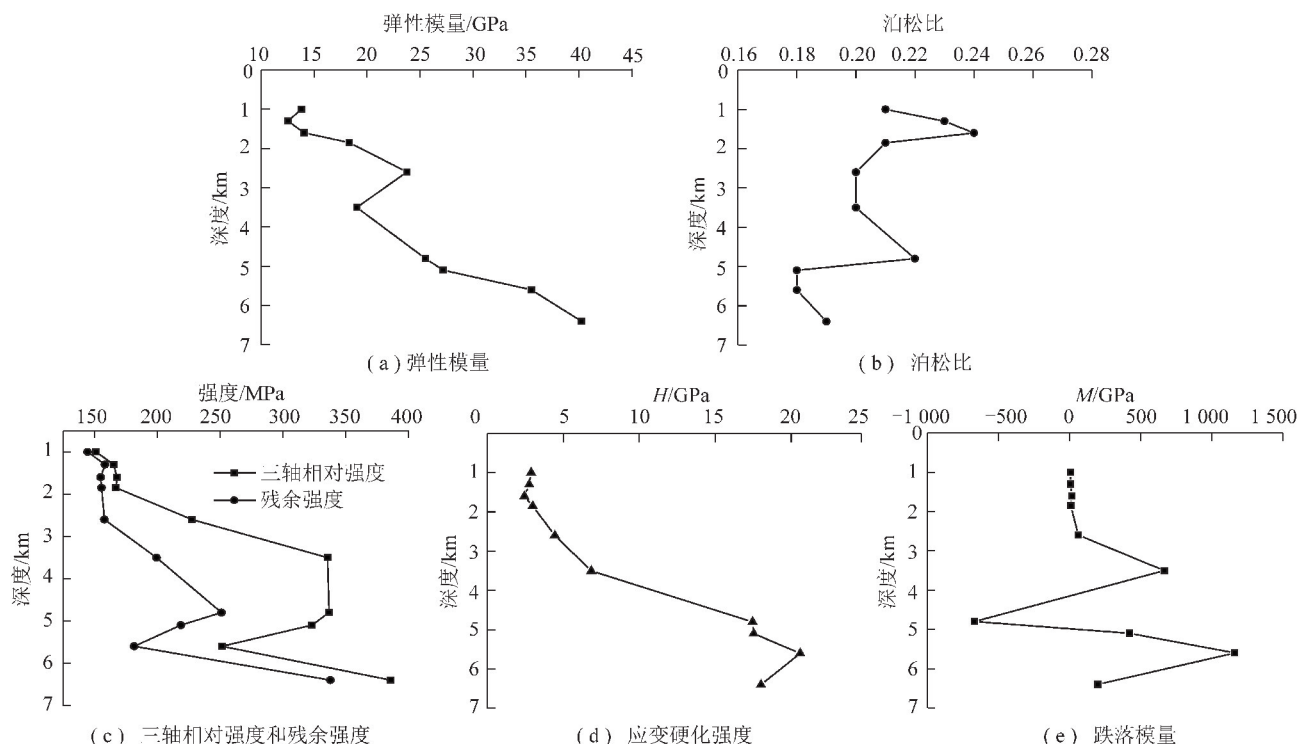


图10 同一围压(52.14 MPa)下在不同深度岩石学参数随深度变化规律

Fig. 10 Variation of petrological parameters with depth at different depths under the same confining pressure (52.14 MPa)

明处于应变软化阶段。3 500 ~ 4 800 m 深砂岩和 5 100 ~ 5 600 m 深砾岩的峰后模量绝对值急剧增大,表明岩石峰后强度迅速跌落(其中 4 800 m 深砂岩的跌落模量为负值,表明该深度下岩石脆性很强,岩石峰后曲线回弹,属于图 3 中的 II 型曲线)。6 400 m 深度下安山岩的峰后模量有所减小。在同一应力水平下,不同深度岩石的脆性特征主要受

其矿物组分影响。整体上,随着深度的增大,由于岩石矿物组分的改变,脆性矿物的影响作用逐渐凸显,岩石的脆性特征逐渐增强。

由图 9 可以看出,同一围压(52.14 MPa)下不同深度岩石的脆性特征也存在较大的差异,根据前文定义的脆性指标,同一围压(52.14 MPa)下不同深度岩石的脆性特征随深度的变化趋势如图 11 所示。

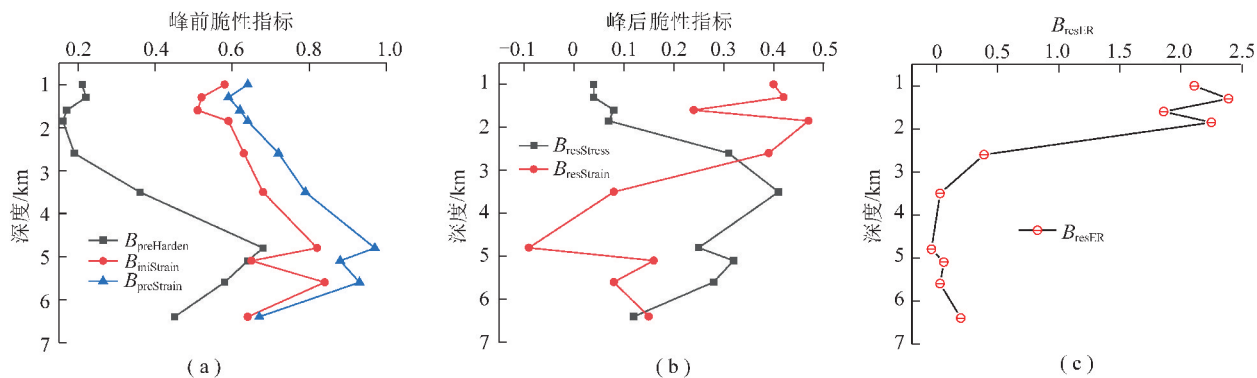


图 11 同一围压(52.14 MPa)下不同深度岩石的脆性特征随深度的变化趋势

Fig. 11 Changing trend of brittleness characteristics of rocks at different depths with depth under the same confining pressure(52.14 MPa)

鲁义强等^[46,54]把岩石矿物成分分成硬相矿物、中等相矿物和弱相矿物(硬相矿物主要包括石英、长石和黄铁矿;中等相矿物主要包括碳酸盐类矿物,主要是方解石;弱相矿物主要包括云母、黏土矿物等),并以松辽盆地 1 000 ~ 6 400 m 深度 10 个深度的岩石为研究对象研究了其力学行为与硬相矿物、中等相矿物和弱相矿物间的关系,研究结果表明:松辽盆地岩石随着深度的增大,基本上呈现弱相矿物减少,中等相矿物增多,硬相矿物略有增大的趋势;不同深度岩石的脆性随着弱相矿物含量的增加而逐渐减小;不同深度岩石的脆性与中等相矿物和硬相矿物含量呈正相关关系。而由图 11 (a) 可知,在同一围压(52.14 MPa)下,1 000 ~ 4 800 m 砂岩峰前脆性指标整体都是随深度的增大而增大的,表明随着深度的增大,岩石的脆性增大。总体上 1 000 ~ 6 400 m 内岩石的峰前脆性指标随着深度的增加而增大,这表明在同一围压下,矿物组分是影响岩石脆性的主导因素,硬相和中等相矿物占比越大,岩石的脆性特征越强。不同深度岩石的峰后脆性指标有一定的差异,由图 11 中 $B_{resStrain}$ 和 B_{resER} 变化趋势可知,在同一围压(52.14 MPa)下,1 000 ~ 4 800 m 深度砂岩以及 5 100 ~ 5 600 m 深度砾岩的峰后脆性随着深度的增大呈现减小趋势。

5 不同深度岩石真实应力水平下脆延特征初探

根据测试结果^[55],把松辽盆地不同深度岩石典

型应力-应变曲线关系绘在同一个坐标系中,如图 12 所示,基本上岩石的三轴强度和残余强度都随着深度的增大,围压的增加而增加。从图 12 可以看出,不同深度不同岩性岩石的力学性质并非随着深度的增加,延性逐渐增加,也不是随着深度的增加走向动态脆性破坏,而是随着深度的增加呈现 3 个阶段的特征:峰后应变软化(1 000 ~ 3 500 m 深砂岩)、峰后脆性(4 800 m 深砂岩和 5 100 ~ 5 600 m 深砾岩)、峰后塑性流动(6 400 m 以深的安山岩)。其主要原因是岩石的力学特性受深度影响是综合作用的结果,其中岩石的组分结构和原位应力状态是 2 个主要因素。

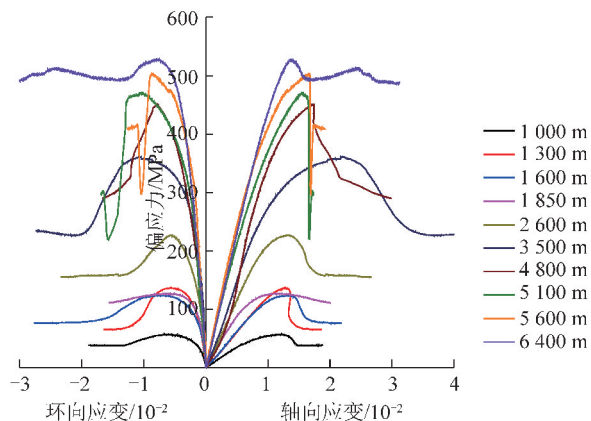


图 12 不同深度岩石真实应力下偏应力-应变曲线^[55]

Fig. 12 Stress-strain curves diagram of rock at different depths under real stress^[55]

由图 12 可以看出,初始应力的变化主要对不同深度岩石常规三轴强度及峰后特性产生影响。从常

规三轴压缩试验结果可以看出,随着深度的增加,初始应力水平增大,偏应力-应变曲线的斜率会明显增大。由此可见,只有认真的考虑初始应力水平的影

响,才能充分认识不同深度岩石的力学性质差异性规律。不同深度岩石在相应深度地应力条件下的常规三轴力学参数随深度的变化趋势如图13所示。

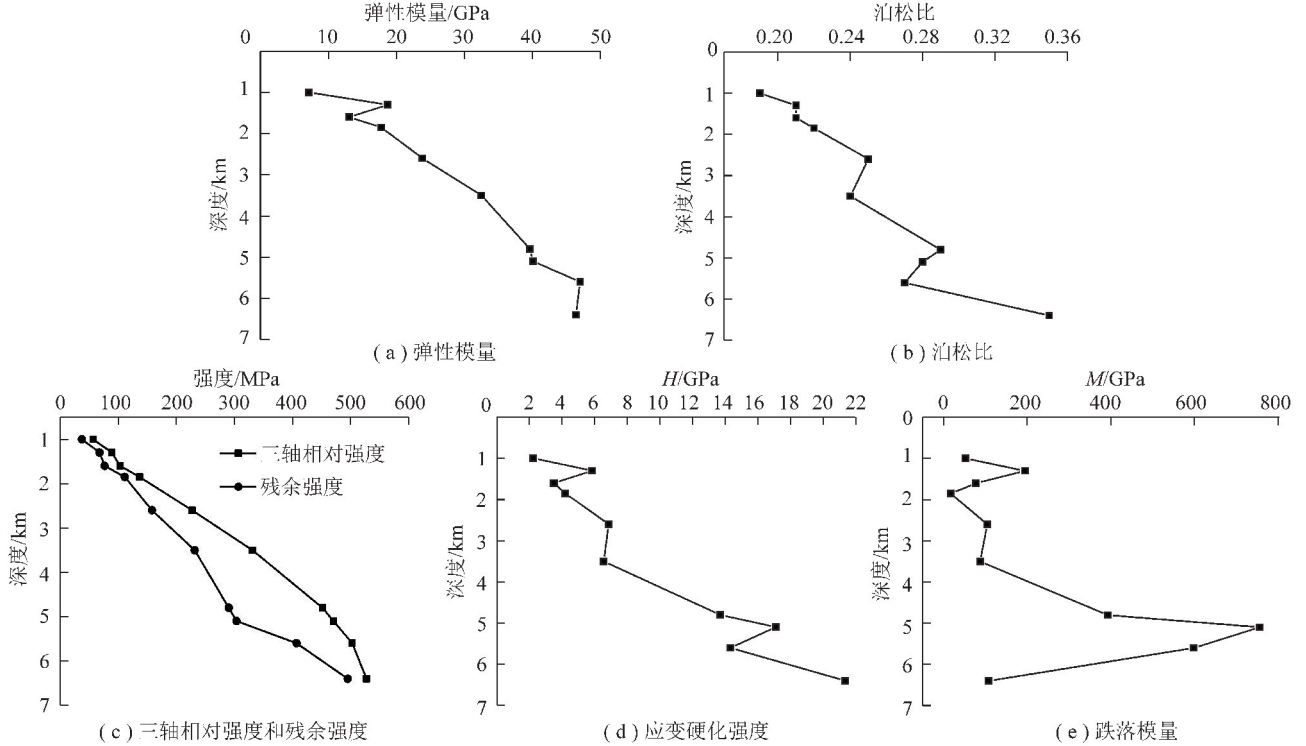


图13 松辽盆地不同深度岩石常规三轴力学参数的差异性^[55]

Fig. 13 Differences in conventional triaxial mechanical parameters of rocks at different depths in the Songliao Basin^[55]

由图13可知,在常规三轴压缩试验中,不同深度岩石的力学参数随着深度的变化基本都呈现非线性趋势。不同深度的砂岩和砾岩的弹性模量 E 均随着深度的增加而增大(图13(a)),显然围压的变化对岩石的弹性变形产生了一定的影响;泊松比 μ 随着深度的增大呈现增大趋势(图13(b)),这是由于围压的影响抑制了岩石的横向变形,并且促进岩石向塑性转化,从而导致泊松比的增大;三轴相对强度和残余强度均随着深度的增长而增大(图13(c));应变硬化模量总体上随着深度的增加而增加(图13(d));峰后跌落模量的非线性更强,对于1 000~4 800 m深度砂岩,其峰后跌落模量总体上随深度的增加逐渐增大,5 100~5 600 m砾岩以及6 400 m深安山岩的跌落模量随深度增加逐渐减小(图13(e))。

根据式(2)和(4)中的脆性指标计算方法,深部不同深度岩石常规三轴压缩试验的脆性特征随深度的变化如图14所示。

由图14(a)可知,不同深度岩石的3类峰前脆性指标随深度的变化趋势同步性较高。1 000~4 800 m深度范围内砂岩3类峰前脆性指标总体上随着深度增加呈现先减后增的趋势,3 500 m深处砂岩塑性最

强,其原因推测为围压和矿物组分对砂岩脆延特性影响存在博弈现象。1 000~3 500 m围压对砂岩的脆延特性起主导作用,故随着围压的增大该范围内砂岩的脆性逐渐降低。3 500~4 800 m深砂岩矿物组分对砂岩的脆延特性起主导作用,故随着深度的增加,长石、碳酸盐类矿物等硬相或中等相矿物含量占比增加,岩石的脆性特征增强;5 100~5 600 m砾岩的峰前脆性指标随深度的增加而减小,其脆性特征减弱。由图14(b)可知,不同深度岩石的峰后脆性指标随深度的变化趋势各异。1 000~4 800 m砂岩的 $B_{resStress}$ 波动较大,规律性不明显。5 100~5 600 m砾岩的 $B_{resStress}$ 随深度的增加而减小,6 400 m安山岩的 $B_{resStress}$ 最小,表现出峰后塑性流动特征。

6 考虑应力环境和赋存深度影响的岩石脆延特性对比

为更加直观的分析不同深度应力环境和矿物组分对岩石脆延特征的影响,探索深部岩石脆延性转化机理,将同一深度岩石不同应力水平下、不同深度岩石同一应力水平下以及不同深度岩石真实应力水平下岩石的脆性指标进行对比,如图15所示。

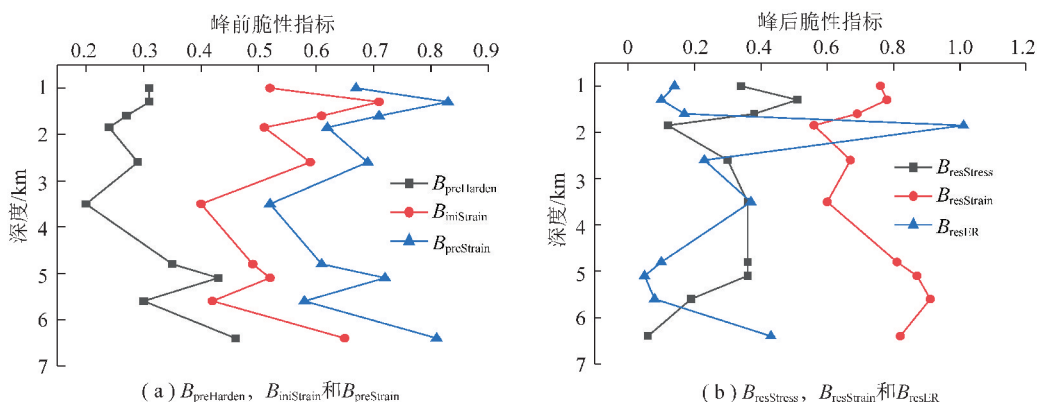
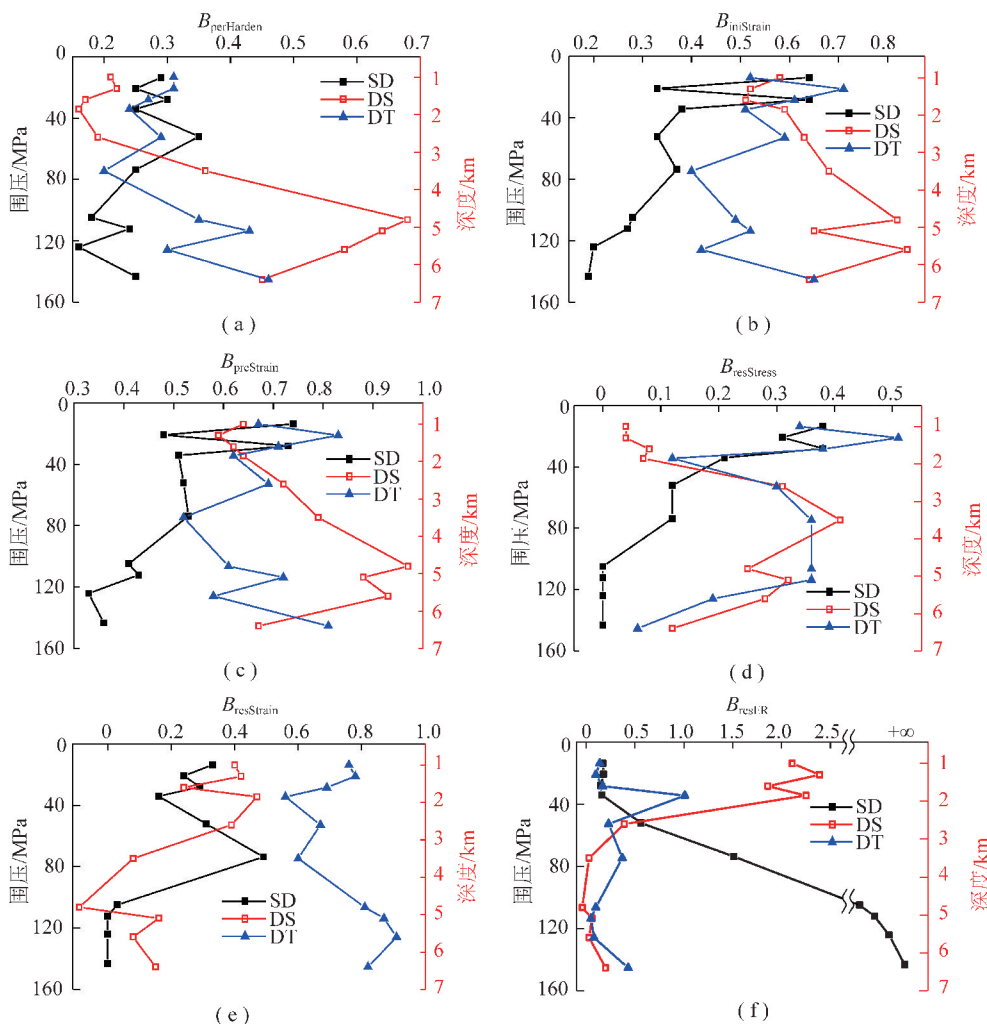
图 14 不同深度岩石脆性评价指标随深度的变化规律^[56]Fig. 14 Variation of the brittleness evaluation index of different depth rocks with depth^[56]

图 15 3种条件下岩石脆性指标对比

Fig. 15 Comparison of rock brittleness indexes under three conditions

图 15 中左纵轴围压与右纵轴深度一一对应。SD 为同一深度岩石(1 600 m 砂岩)不同应力水平下脆性指标的演化曲线,对应围压纵轴;DS 为不同深度岩石同一应力水平下(52.14 MPa)脆性指标的演化曲线,对应深度纵轴;DT 为不同深度岩石真实应力水平下脆性指标的演化曲线,与围压纵轴和深度纵

轴均对应。由图 15 可以看出,同一深度砂岩在不同应力水平下,随着围压的增大,其脆性整体上逐渐减小,在这种情况下围压对岩石的脆性起主导性作用,会抑制岩石的脆性;不同深度岩石在同一应力水平下,随深度的增加其脆性矿物占比增加,导致岩石脆性逐渐增大,在这种情况下岩石的矿物组分对其脆性

起主导作用;不同深度岩石真实应力水平下,其脆性呈现先增大后减小趋势。在这种情况下围压与矿物组分均对岩石脆延特征有影响,且2者之间存在博弈现象。上述结果表明岩石的脆性受到多种因素的综合影响,其中应力环境和矿物组分是2个关键因素。通过对同一深度岩石不同应力水平,不同深度岩石同一应力水平,不同深度岩石真实应力水平下的三轴力学实验的研究,可以得出一个基本的结论:岩石矿物组分和初始应力水平都是影响不同深度岩石力学性质的重要因素。随着深度的增加,长石、碳酸盐类矿物等脆性矿物含量的增加会导致岩石的脆性增长,但是随着深度增加,初始应力水平的增加又会抑制岩石的脆性增长。这2种控制因素此消彼长,存在博弈现象,具体在哪种条件下,哪个因素起主导作用,还需要大量的数据验证。同时,在岩石脆延性转化过程中,能量转换机制的作用也不容忽视^[57-59]。目前已经有从很多能量角度表达脆性指数的指标,下一步可以结合不同深度应力条件,考虑从能量存储-耗散转换的角度,提出能科学表达岩石脆延转化的新指标。

7 结 论

(1)深部岩石脆延转化并非瞬时的,而是存在一个脆延性逐渐转换的应力区间。对于松辽盆地1 600 m赋存深度的砂岩,实验表明50~70 MPa围压为其脆延性转化区间。

(2)同一深度砂岩不同应力水平下其脆性特征主要受围压影响。随着围压的增大,砂岩性质出现了从脆性—延性—应变硬化的转变,其峰后塑性逐渐增强,直到峰后呈现完全塑性。

(3)相同围压下岩石的脆延性特征主要受其本身矿物组分的影响。对于松辽盆地岩石样品,其硬相和中等相矿物含量随深度的增加而增大,导致其脆性增大,由浅至深表现出延性—脆延转化—脆性的特征。

(4)不同深度岩石真实应力水平下其峰后特性随着深度的增加呈现出不同的特征:1 000~3 500 m深砂岩表现出峰后应变软化特征,4 800 m深砂岩和5 100~5 600 m深砾岩表现出峰后脆性特征,6 400 m以深的安山岩表现出峰后塑性流动特征。

(5)深部岩石的脆性特征受诸多因素影响,其中岩石的矿物组分和应力环境对岩石的脆性影响存在博弈现象,中等相、硬相矿物含量的增加会导致其脆性增长,而加载应力水平的增加,又会抑制其脆性增长。

需要特别说明的是本文采用的不同深度岩石均从松辽盆地不同深度获取,旨在更加真实的研究不同深度岩石脆延转化力学行为规律。然而由于不同深

度岩石并非同一岩性,故研究结果存在一定缺陷,后续还需结合围压和矿物组分对岩石脆延特性影响的单一变量实验,进一步深入探索不同深度下岩石的脆延特性转换机理。同时,由于现有技术与理论的限制,本文并没有考虑深部岩石取芯过程中的主应力转化、加卸载条件变化等力学过程,以及温度、湿度等因素对岩石力学特性的影响。针对这些影响因素后续还需深入研究,这也是未来深部原位岩石力学需要重点探索的方向。

参考文献(References):

- [1] 谢和平. 深部岩体力学与开采理论研究进展[J]. 煤炭学报, 2019, 44(5): 1283-1305.
XIE Heping. Research review of the state key research development program of China: Deep rock mechanics and mining theory[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(5): 1283-1305.
- [2] 谢和平, 高峰, 鞠杨, 等. 深地科学领域的若干颠覆性技术构想和研究方向[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(1): 1-8.
XIE Heping, GAO Feng, JU Yang, et al. Novel idea and disruptive technologies for the exploration and research of deep earth[J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(1): 1-8.
- [3] 谢和平, 高明忠, 刘见中, 等. 煤矿地下空间容量估算及开发利用研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(6): 1487-1503.
XIE Heping, GAO Mingzhong, LIU Jianzhong, et al. Research on exploitation and volume estimation of underground space in coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(6): 1487-1503.
- [4] 高明忠, 王明耀, 谢晶, 等. 深部煤岩原位扰动力学行为研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(8): 2691-2703.
GAO Mingzhong, WANG Mingyao, XIE Jing, et al. In-situ disturbed mechanical behavior of deep coal rock[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(8): 2691-2703.
- [5] 谢和平, 高峰, 鞠杨, 等. 深地煤炭资源流态化开采理论与技术构想[J]. 煤炭学报, 2017, 42(3): 547-556.
XIE Heping, GAO Feng, JU Yang, et al. Theoretical and technological conception of the fluidization mining for deep coal resources[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(3): 547-556.
- [6] 谢和平, 高峰, 鞠杨, 等. 深部开采的定量界定与分析[J]. 煤炭学报, 2015, 40(1): 1-10.
XIE Heping, GAO Feng, JU Yang, et al. Quantitative definition and investigation of deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(1): 1-10.
- [7] 谢和平, 高明忠, 张茹, 等. 地下生态城市与深地生态圈战略构想及其关键技术展望[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(6): 1301-1313.
XIE Heping, GAO Mingzhong, ZHANG Ru, et al. Strategic conception of underground eco-city and deep-earth ecosphere and its key technology prospects[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(6): 1301-1313.
- [8] 伊名. 亚洲最深大陆科学钻井正式完井松科二井入地7018米[J]. 中国地质教育, 2018, 27(2): 96.
YI Ming. Asia's deepest continental scientific drilling was official-

- ly completed and Songke No.2 well penetrated 7018 meters into the ground[J]. Chinese Geological Education, 2018, 27(2): 96.
- [9] GAO M, JIN W, DAI Z, et al. Relevance between abutment pressure and fractal dimension of crack network induced by mining[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2013, 23(6): 925-930.
- [10] 谢和平, 高峰, 鞠杨. 深部岩体力学研究及探索[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2161-2178.
XIE Heping, GAO Feng, JU Yang. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2161-2178.
- [11] 谢和平. “深部岩体力学与开采理论”研究构想与预期成果展望[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(2): 1-16.
XIE Heping. Research framework and anticipated results of deep rock mechanics and mining theory[J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(2): 1-16.
- [12] 彭瑞东, 薛东杰, 孙华飞, 等. 深部开采中的强扰动特性探讨[J]. 煤炭学报, 2019, 44(5): 1359-1368.
PENG Ruidong, XUE Dongjie, SUN Huafei, et al. Characteristics of strong disturbance to rock mass in deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(5): 1359-1368.
- [13] XIE H, GAO M, ZHANG R, et al. Study on the mechanical properties and mechanical response of coal mining at 1000 m or deeper[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(5): 1475-1490.
- [14] GAO M, ZHANG J, LI S, et al. Calculating changes in fractal dimension of surface cracks to quantify how the dynamic loading rate affects rock failure in deep mining[J]. Journal of Central South University, 2020, 27(10): 3013-3024.
- [15] GAO M Z, ZHANG R, XIE J, et al. Field experiments on fracture evolution and correlations between connectivity and abutment pressure under top coal caving conditions[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 111: 84-93.
- [16] 高明忠, 刘建军, 林文明, 等. 特厚煤层超前采动原位应力演化规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(2): 28-35.
GAO Mingzhong, LIU Junjun, LIN Wenming, et al. Study on in-situ stress evolution law of ultra-thick coal seam in advance mining[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(2): 28-35.
- [17] GAO M, ZHANG Z, XIANGANG Y, et al. The location optimum and permeability-enhancing effect of a low-level shield rock roadway[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, 51(9): 2935-2948.
- [18] XIE J, GAO M, ZHANG R, et al. Gas flow characteristics of coal samples with different levels of fracture network complexity under triaxial loading and unloading conditions[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 195: 107606.
- [19] 高明忠, 金文城, 郑长江, 等. 采动裂隙网络实时演化及连通性特征[J]. 煤炭学报, 2012, 37(9): 1535-1540.
GAO Mingzhong, JIN Wencheng, ZHENG Changjiang, et al. Real time evolution and connectivity of mined crack network[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(9): 1535-1540.
- [20] 李俊如, 李海波. 不同埋深岩石力学特性的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(A01): 948-951.
- LI Junru, LI Haibo. Experimental study on mechanical properties of rocks at different depths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(A01): 948-951.
- [21] 周宏伟, 谢和平, 左建平, 等. 赋存深度对岩石力学参数影响的实验研究[J]. 科学通报, 2010, 55(34): 3276-3284.
ZHOU H W, XIE H P, ZUO J P, et al. Experimental study of the effect of depth on mechanical parameters of rock (in Chinese). Chinese Sci Bull (Chinese Ver), 2010, 55(34): 3276-3284.
- [22] 王天琪, 韩江涛, 侯贺晨, 等. 综合物探剖面揭示松辽盆地基底地质与地球物理特征——以过松科二井剖面为例[J]. 中国地质, 2019, 46(5): 1126-1136.
WANG Tianqi, HAN Jiangtao, HOU Hesheng, et al. The comprehensive geophysical prospecting profile reveals the basement geological and geophysical characteristics of the Songliao Basin: Taking the second well section of Songke as an example[J]. Chinese Geology, 2019, 46(5): 1126-1136.
- [23] HOU H, WANG C, ZHANG J, et al. Deep continental scientific drilling engineering project in Songliao Basin: progress in earth science research[J]. China Geology, 2018, 1(2): 173-186.
- [24] 周宏伟, 谢和平, 左建平. 深部高地应力下岩石力学行为研究进展[J]. 力学进展, 2005(1): 91-99.
ZHOU Hongwei, XIE Heping, ZUO Jianping. Research progress of rock mechanical behavior under deep high ground stress[J]. Advances in Mechanics, 2005(1): 91-99.
- [25] 谢和平, 高明忠, 张茹, 等. 深部岩石原位“五保”取芯构想与研究进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(5): 865-876.
XIE Heping, GAO Mingzhong, ZHANG Ru, et al. Study on concept and progress of in situ fidelity coring of deep rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(5): 865-876.
- [26] 谢和平, 张国庆, 罗通, 等. 月球大深度保真取芯探矿机器人系统构想与设计[J]. 工程科学与技术, 2020, 52(2): 1-9.
XIE Heping, ZHANG Guoqing, LUO Tong, et al. Scheme and design of a lunar large-depth and in-situ condition-holding coring robot system[J]. Advanced Engineering Sciences, 2020, 52(2): 1-9.
- [27] LIANG X. Damage accumulation and fracture initiation in uncracked ductile solids subject to triaxial loading[J]. International Journal of Solids & Structures, 2007, 44(16): 5163-5181.
- [28] PATERSON M S. Experimental deformation and faulting in Wombeyan marble[J]. Geological Society of America Bulletin, 1958, 69(4): 465-476.
- [29] MARTIN C D, STIMPSON B. The effect of sample disturbance on laboratory properties of Lac du Bonnet granite[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(5): 692-702.
- [30] HANDIN J. An application of high pressure in geophysics: Experimental rock deformation[J]. Trans. ASME, 1953, 75(3): 315-324.
- [31] POTRO R D, M Hürlimann. Geotechnical classification and characterisation of materials for stability analyses of large volcanic slopes[J]. Engineering Geology, 2008, 98(1-2): 1-17.
- [32] CLEARY M P. Effects of depth on rock fracture[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1991, 28(2-3): A76.
- [33] 周宏伟, 左建平, 王驹, 等. 温度-应力作用下北山花岗岩的微观破坏实验研究[A]. 第二届废物地下处置学术研讨会[C].

- 敦煌,2008.
- ZHOU Hongwei, ZUO Jianping, WANG Ju, et al. Experimental study on the meso-destructive behavior of Beishan granite under temperature-stress action [A]. The Second Symposium on Underground Waste Disposal [C]. Dunhuang, 2008.
- [34] TURNER F J, HEARD H, GRIGGS D T. Experimental deformation of enstatite and accompanying inversion to clinoenstatite [A]. Report of 21st International Geological Congress [C]. Copenhagen, 1960.
- [35] XIE J, GAO M, ZHANG R, et al. Experimental investigation on the anisotropic fractal characteristics of the rock fracture surface and its application on the fluid flow description [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020; 107190.
- [36] PATERSON M S, WONG T. Experimental rock deformation—the brittle field [M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2005.
- [37] EVANS B, FREDRICH J T, WONG T F. The brittle-ductile transition in rocks: Recent experimental and theoretical progress [J]. The Brittle-Ductile Transition in Rocks, 1990, 56: 1–20.
- [38] BLENKINSOP T G. Deformation microstructures and mechanisms in minerals and rocks [M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2007.
- [39] BRACE W F. Volume changes during fracture and frictional sliding: A review [J]. Pure and Applied Geophysics, 1978, 116 (4–5): 603–614.
- [40] BAUD P, SCHUBNEL A, WONG T F. Dilatancy, compaction, and failure mode in Solnhofen limestone [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2000, 105 (B8): 19289–19303.
- [41] BAUD P, MEREDITH P, TOWNEND E. Permeability evolution during triaxial compaction of an anisotropic porous sandstone [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2012, 117 (B5): 1–23.
- [42] FOSSEN H, SCHULTZ R A, TORABI A. Conditions and implications for compaction band formation in the Navajo Sandstone, Utah [J]. Journal of Structural Geology, 2011, 33 (10): 1477–1490.
- [43] BAUD P, KLEIN E, WONG T. Compaction localization in porous sandstones: Spatial evolution of damage and acoustic emission activity [J]. Journal of Structural Geology, 2004, 26 (4): 603–624.
- [44] ZHU W, BAUD P, VINCIGUERRA S, et al. Micromechanics of brittle faulting and cataclastic flow in Mount Etna basalt [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2016, 121 (6): 4268–4289.
- [45] HERRMANN J, RYBACKI E, SONE H, et al. Deformation experiments on bowland and posidonia shale—Part I: Strength and Young's Modulus at ambient and in situ p-c-T conditions [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, 51 (12): 3645–3666.
- [46] LU Y, LI C, HE Z, et al. Variations in the physical and mechanical properties of rocks from different depths in the Songliao Basin under uniaxial compression conditions [J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2020, 6 (3): 1–14.
- [47] MOGI K. Experimental rock mechanics [M]. Florida: CRC Press, 2006.
- [48] RYBACKI E, REINICKE A, MEIER T, et al. What controls the mechanical properties of shale rocks? -Part I: Strength and Young's modulus [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2015, 135: 702–722.
- [49] RYBACKI E, MEIER T, DRESEN G. What controls the mechanical properties of shale rocks? -Part II: Brittleness [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2016, 144: 39–58.
- [50] HUCKA V, DAS B. Brittleness determination of rocks by different methods [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1974, 11 (10): 389–392.
- [51] SMOLT CZYK U, GARTUNG E. Geotechnical properties of a soft Keuper sandstone [J]. 4th ISRM Congress, 1979, 1 (2): 639–644.
- [52] TARASOV B, POTVIN Y. Universal criteria for rock brittleness estimation under triaxial compression [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, 59: 57–69.
- [53] BOUISSOU S, CHEMENDA A, AMBRE J, et al. Initiation and evolution of a network of deformation bands in a rock analogue material at brittle-ductile transition [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52 (3): 737–752.
- [54] 鲁义强. 不同深度岩石物理力学行为差异性规律研究 [D]. 成都: 四川大学, 2020.
- LU Yiqiang. Study on the difference law of physical and mechanical behavior of rocks at different depths [D]. Chengdu: Sichuan University, 2020.
- [55] 谢和平, 李存宝, 高明忠, 等. 深部原位岩石力学构想与初步探索 [J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40 (2): 217–232.
- XIE Heping, LI Cunbao, GAO Mingzhong, et al. Conceptualization and preliminary research on the rock mechanics retaining in situ geological condition of deep rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40 (2): 217–232.
- [56] XIE H, LI C, HE Z, et al. Experimental study on rock mechanical behavior retaining the in situ geological conditions at different depths [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021 (138): 104548. doi: 10. 1016/j. ijrmms. 2020. 104548.
- [57] 谢和平, 彭瑞东, 鞠杨. 岩石变形破坏过程中的能量耗散分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23 (21): 3565–3570.
- XIE Heping, PENG Ruidong, JU Yang. Energy dissipation of rock deformation and fracture [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23 (21): 3565–3570.
- [58] 谢和平, 鞠杨, 黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24 (17): 3003–3010.
- XIE Heping, JU Yang, LI Liyun. Criteria for strength and structural failure of rocks based on energy dissipation and energy release principles [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (17): 3003–3010.
- [59] 宫凤强, 闫景一, 李夕兵. 基于线性储能规律和剩余弹性性能指数的岩爆倾向性判据 [J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37 (9): 1993–2014.
- GONG Fengqiang, YAN Jingyi, LI Xibing. Rockburst tendency criterion based on linear energy storage law and residual elastic energy index [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37 (9): 1993–2014.