

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2016.05.014

预制裂纹盐岩单轴力学特性及能量机制试验

王伟超^{1,2}, 刘希亮¹, 王 利¹, 郭佳奇¹

(1. 河南理工大学 土木工程学院, 河南 焦作 454003;

2. 河南省高等学校深部矿井建设重点学科开放实验室, 河南 焦作 454003)

摘 要: 盐穴储气库在水溶造腔时会产生大量溶蚀裂纹, 为研究裂纹对盐岩强度和变形等力学性能的影响, 利用 MTS-815 岩石力学实验系统, 对不同参数裂纹盐岩的力学特性进行试验研究, 采用对数应变对试验结果进行修正, 分析了不同参数裂纹对盐岩的强度和变形的影响, 并基于能量耗散理论分析其损伤破坏过程中的能量特征。结果表明: 不同倾角裂纹降低了试样的峰值强度值, 但降低量的多少与裂纹倾角大小未呈现明显的线性关系; 不同长度的预制裂纹对盐岩峰值强度有明显的弱化作用, 裂纹越长, 弱化作用越大。外力做功产生的总应变能 U 绝大部分转化为耗散能 U_d , 小部分累积为可释放的弹性应变能 U_e , 导致盐岩内部产生损伤和塑性变形。破坏过程总能耗、耗散能、弹性应变能等, 能量与应变关系曲线表现出明显的阶段特征; 盐岩单轴压缩呈现压密阶段、弹性变形阶段、塑性变形阶段和破坏阶段等 4 个阶段。

关键词: 盐岩; 岩石力学; 强度特性; 裂纹

中图分类号: TU45

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2016)05-103-11

Mechanical behavior and energy mechanism of salt rock with prefab fissures under uniaxial compression

WANG Weichao^{1,2}, LIU Xiliang¹, WANG Li¹, GUO Jiaqi¹

(1. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, Henan, P.R.China;

2. Henan Colleges and Universities Deep Mine Construction Key Discipline Open Laboratory, Jiaozuo 454003, Henan, P.R.China)

Abstract: A mass of corrosion fissures arise during the washing process of rock salt cavern. In order to study the influence of fissures on the mechanical properties of salt rock, the mechanical properties of the cracked salt rock with different parameters were tested and studied by using MTS-815 rock mechanics test system. The test results were modified by logarithmic strain, the effects of fissures with different parameters on the strength and the deformation of salt rock were analyzed, and the energy characteristics in the process of the damage were analyzed based on the theory of energy dissipation. The testing results indicate that the peak strength of salt rock with different fissure angles are lower than that of intact salt rock, and the relationship between the reduction extent and the fissure angle isn't linear. The length of

收稿日期: 2016-03-10

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(51474097); 河南省高等学校重点科研资助项目(15A410004); 河南省高校基本科研业务费专项资金资助项目(NSFRF140145)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (51474097), Henan Province Colleges and Universities Key Scientific Research Project(15A410004) and the Fundamental Research Funds for the Universities of Henan Province (NSFRF140145).

作者简介: 王伟超(1979-), 男, 博士研究生, 主要从事岩石力学与岩层控制研究, (E-mail) wang20002@hpu.edu.cn.

prefab fissure has obvious weakening effect on the peak intensity of salt rock. The longer the fissures are, the greater the weakening effect is. Most part of the total strain energy U produced by external force transforms into dissipated energy U_d , and a small part is accumulated as the releasable elastic strain energy U_e , which causes the damage and the plastic deformation in the salt rock. In the failure progress, the curves between energy, such as total energy consumption, dissipation energy and elastic strain energy, and strain present evident stage characteristics. The uniaxial compression of salt rock shows four stages: compression stage, elastic deformation stage, plastic deformation stage and failure stage.

Keywords: salt rock; rock mechanics; strength behavior; fissure

盐岩具有良好的密封性、低渗透率,是能源战略地下储气(油)库的理想介质。国外(主要以美国、德国为主)在 20 世纪 70~90 年代,由于建造盐岩溶腔油气储库以及核废料地质处置库,对盐岩的力学特性已经进行过深入细致的研究^[1]。中国与国外的盐丘不同,近年来国内学者也进行了大量相关研究,主要集中在盐岩的强度与变形性能^[2-5]、周期荷载下的疲劳变形^[6-8]、数值模拟^[9]、相似模拟^[10]、声发射(acoustic emission, AE)特征^[11-12]等方面的研究。盐岩在水溶建腔和注采运行过程中,受荷载作用时不可避免会产生溶蚀裂纹,裂纹盐岩在荷载作用下的损伤破裂研究则显得十分重要。

近些年来,国内外科研工作者对裂隙岩体进行了大量研究,取得了很多研究成果。王利等^[13]通过岩石 AE 序列来确定岩石尺度演化发展阶段,并通过岩石断裂尺度建立了适用于微裂纹演化阶段 II 的损伤演化模型。许江等^[14]通过研究原生裂纹对煤岩剪切破坏宏细观演化规律的影响,发现水平表面原生裂纹使煤岩局部破坏模式复杂多样化,而垂直表面原生裂纹对煤岩破坏模式影响不明显。裴建良等^[15]利用声发射定位技术研究了单轴压缩大理岩破裂过程中,不同空间组合类型自然裂隙的空间动态演化过程,并结合声发射振铃计数实现了对自然裂隙及其扩展过程的精确定位。任利等^[16]通过分析单个线性裂纹在压缩载荷作用下的剪切断裂条件,明确了压缩状态下张破裂剪切断裂韧性的物理意义及其求解办法。杨圣奇^[17]通过预制穿透裂隙,对断续三裂隙长方体砂岩试样进行单轴压缩试验,探讨了岩桥倾角对断续三裂隙砂岩强度破坏和裂纹扩展特征的影响。

国内学者对盐岩裂纹损伤扩展的研究相对较少,李林等^[18]利用细观分析技术对单轴压缩条件下的盐岩断续裂纹扩展及分布进行研究。主要集中在盐岩疲劳破坏试验研究,马林建等^[6]认为通过试验可间接推断盐岩三轴循环变形破坏的上限应力阈值为 80%~89%,并发现盐岩二次压缩表现出比一次压缩更为显著的应变硬化特征。郭印同等^[7]试验研究了单轴循环荷载下盐岩的疲劳强度、变形及损伤特性,盐岩的循环疲劳破坏过程同样受到静态全过程曲线的控制。杨春和等^[19]在盐岩单轴循环加卸载试验中发现,随着荷载级别的增高,无论是卸载还是再加载,直线段的变形模量总体上呈上升的趋势。

综上所述,文献关于盐岩强度与变形特性研究成果较多,而监测不同参数裂纹对盐岩强度和变形特征影响的研究鲜见报导。但是,盐岩储库在水溶建腔期间,受到水溶和荷载作用,腔体盐岩围岩层受到水平的卸荷作用和纵向的加载作用,应力场的变化使盐岩层不可避免产生微裂纹和裂隙,研究裂纹在荷载作用下对强度和变形特征影响及受荷载破坏过程中的能量特征具有重要意义。

文中通过对平顶山叶舞盐系含预制裂纹盐岩进行的单轴压缩试验,研究了不同特征参数(裂纹倾角、裂纹长度)对盐岩强度、变形的影响,并基于能量耗散理论分析了盐岩损伤破坏过程中的能量特征,以期对盐岩溶腔储库设计及安全稳定运营提供参考和借鉴。

1 试验条件及方法

1.1 岩样制备

试验所用岩芯取河南平顶山叶舞盐矿,取样深度为 1 800~2 200 m,主要为白云质泥岩、硬石膏质泥岩、石盐岩、含硬石膏石盐岩等。经现场岩芯,取芯直径为 70 mm,密封包装后运回实验室。由于盐岩易溶于水,试件加工时采用油作为降温介质。岩样按照国际岩石力学学会(ISRM)的要求,加工成 70 mm×140 mm 的圆柱形岩样。端面平行度为±0.02 mm,满足测定方法的要求,岩样具体尺寸如表 1 所示。同时,由于叶舞盐

岩结构致密,试验前对加工完成试件观察,确定没有明显的节理、裂纹等弱面,保证了试样之间宏观上没有明显差异。

为了制作图 1 所示的预制裂纹岩样,其中裂纹长度为 l ,裂纹倾角为 α (α 为裂纹与垂直方向夹角),采用 0.3 mm 金刚砂线锯手工预制,制成的裂纹厚度为 0.5 mm 左右。为研究不同几何参数裂纹对试件强度与变形特征的影响规律,预制了 5 种不同裂纹。裂纹几何参数详见表 1。

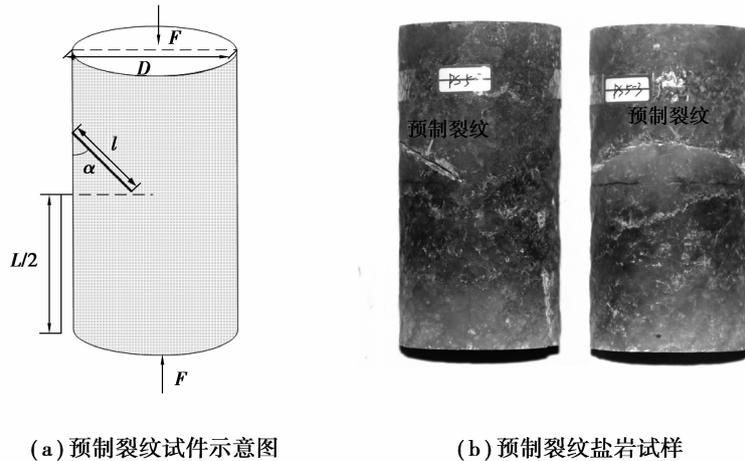


图 1 预制裂纹示意图及加工岩样
Fig.1 Prefab fissures and specimens

表 1 盐岩试件及预制裂纹参数

Table 1 Salt rock specimens and prefab fissures parameters

编号	是否含裂纹	试件尺寸/mm		预制裂纹几何参数	
		长度 L	直径 D	裂纹长度/mm	裂纹倾角/ $^{\circ}$
PS1-1	含裂纹	140.60	68.80	20	45
PS2-1	含裂纹	139.12	68.10	20	60
PS3-1	含裂纹	139.10	69.00	20	75
PS4-1	含裂纹	139.70	69.30	30	60
PS5-1	含裂纹	140.00	69.62	40	60
PS6-1	完整	139.82	66.90	—	—
PS6-3	完整	140.40	63.10	—	—

1.2 加载条件

试验在山东科技大学 MTS815 岩石伺服试验机上进行,该试验系统具有 3 套独立的控制加载设备,可分别控制轴压、围压和孔压,轴向压力最大可加载 2 700 kN,最大围压为 50 MPa。采用链式传感器测定环向变形,由于盐岩属软岩,为更好地观察裂纹扩展形态,试验采用位移控制,加载速率为 0.002 mm/s,在试验出现峰值后停止加载。整个试验过程中,同时记录试验岩样的轴向荷载、轴向位移和径向变形,并且在试件两端加上与岩样直径匹配的刚性垫块,以减小端部效应对试验结果的影响。

2 试验数据的对数修正

通常表示应变量大小的方法包括工程应变和对数应变 2 种^[20]。工程应变亦称为名义应变,即试件的变形量与初始高度的比值。对数应变亦称为自然应变,即在应变主轴保持不变条件下的应变增量的总和。工程应变可表示为

$$\varepsilon_0 = \frac{l_0 - l_1}{l_0}, \quad (1)$$

式中： ε_0 为工程应变； l_0 为试件初始长度； l_1 为试件压缩后长度。

对数应变可表示为

$$\varepsilon_n = \frac{l_0 - l_1}{l_0} + \frac{l_1 - l_2}{l_1} + \dots + \frac{l_n - l_{n+1}}{l_n}, \quad (2)$$

$$\varepsilon_n = \int_{l_0}^{l_n} \frac{1}{l} dl = \ln \frac{l_n}{l_0}, \quad (3)$$

式中： ε_n 为对数应变； l_0 为试件初始长度； l_n 为试件压缩的某中间状态长度。

由于盐岩试件变形量较大，工程应变不能反映其真实变形特征，因此，利用对数应变进行数据处理和分析。在室内岩石力学试验的数据处理分析中，轴向应力计算通常假定试件的横截面面积不变，恒等于试件加载前的初始面积，不考虑试件受载过程中面积变化的影响，即

$$\sigma_{1u} = \frac{F}{A_0}, \quad (4)$$

式中： σ_{1u} 为未修正试件横截面面积的轴向应力； F 为轴向荷载； A_0 试件初始横截面面积。

然而，由于盐岩具有较好的变形性能，盐岩试件在受荷过程中，轴向变形量较大导致其横截面积增加较多，因此，应对变化后的横截面积进行修正，再计算修正后的轴向应力，即

$$A_{1n} = \frac{A_0}{1 - \varepsilon_{1n}}, \quad (5)$$

$$\sigma_{1n} = \frac{F}{A_{1n}}, \quad (6)$$

式中： A_{1n} 为采用对数应变 ε_{1n} 修正后的横截面面积； σ_{1n} 为采用对数应变修正后的轴向应力； ε_{1n} 为试件压缩中间状态的应变。

根据对数应变计算的修正轴向应力与未修正的应力绘于图 2 进行对比，不难发现，在应变超过 4% 以后，2 条曲线偏离越来越大。对于盐岩等变形量大的较软岩，必须对应力进行修正，否则会造成较大计算误差。因此，文中对试件的应力应变数据全部进行对数修正。

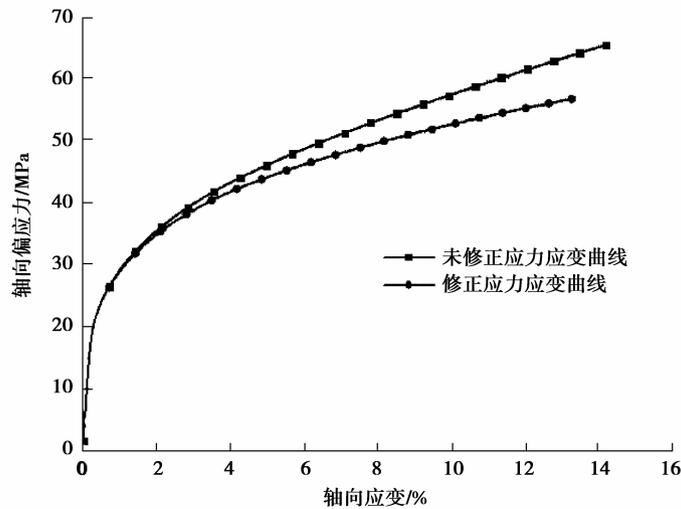


图 2 应力应变曲线修正前后对比

Fig.2 Comparison between Corrected and uncorrected stress strain curve

3 完整盐岩试验结果及分析

为获取完整叶舞盐岩的基本物理力学参数，在室温条件下，进行常规单轴加载试验，由于盐岩岩芯不易获取，且盐岩试件加工较难，本次常规单轴加载试验的重复性较好，因此，常规单轴加载试验只进行 2 个试

件,获得完整叶舞盐岩极限强度平均值为 29.01 MPa,其他相关力学参数如表 2 所示。

表 2 完整盐岩单轴压缩试验力学参数

Table 2 Mechanical parameters of intact salt rock under uniaxial compression

编号	σ_{1n}/MPa	E/GPa	E_{50}/GPa	E_0/GPa	$\epsilon_{1n}/\%$	$\epsilon_{3n}/\%$
PS6-1	29.19	7.85	3.06	1.19	2.46	2.26
PS6-3	28.83	7.71	3.25	1.02	2.79	2.17
平均值	29.01	7.78	3.16	1.11	2.63	2.22

表 2 中: σ_{1n} 为盐岩修正的单轴抗压强度; E 为岩石的弹性模量(应力-应变曲线上近似直线部分斜率); E_{50} 为岩石的割线模量(应力-应变曲线上相应于 50%抗压强度点与原点连线斜率); E_0 为岩石的变形模量(应力-应变曲线上峰值强度点与原点连线斜率); ϵ_{1n} 为峰值强度所对应的修正轴向应变; ϵ_{3n} 为岩石峰值强度所对应的环向应变。

从图中 3 可以看出盐岩单轴压缩与其它岩石较为类似,呈现压密阶段(oa 段)、弹性变形阶段(ab 段)、塑性变形阶段(bc 段)和破坏阶段(cd 段)4个阶段:

1)压密阶段(oa 段)。曲线呈现上“凹”形。究其原因,一方面是盐岩试件尽管从宏观观察比较密实,无宏观裂纹,但试件内部仍存在微细观裂纹、节理等;另一方面,试件加工存在的误差,导致两加载面未能保持绝对平行,使曲线呈上凹形。此阶段环向变形非常小,近乎为零,可认为没有环向变形。

2)弹性变形(ab 段)。此阶段应力-应变关系呈直线形状。试件压密之后,其变形服从虎克定律,该阶段所施加的荷载没有使岩样形成新的微裂纹,盐岩晶粒相互压挤,只有少量的晶粒错动。此阶段环向变形亦非常小。

3)塑性变形阶段(bc 段)。此阶段应力-应变关系呈上凸形。表明试件内部薄弱部分产生裂纹,并且内部裂纹逐步稳定扩展,随着应力增大,接近峰值应力时,微裂纹快速聚集,形成主裂纹。此阶段环向应变-轴向应变曲线微微呈现上凹,表现环向变形速率逐步加大。

4)破坏阶段(cd 段)。此阶段应力-应变关系呈上凸形。表明内部大量裂纹产生并形成贯通裂纹,岩石承载骨架已经基本破坏,承载力迅速下降,岩样靠未断裂局部和裂隙面间的摩擦力来承载。随着轴向应变的增加,环向应变迅速增大,超过了轴向应变的增加速率。

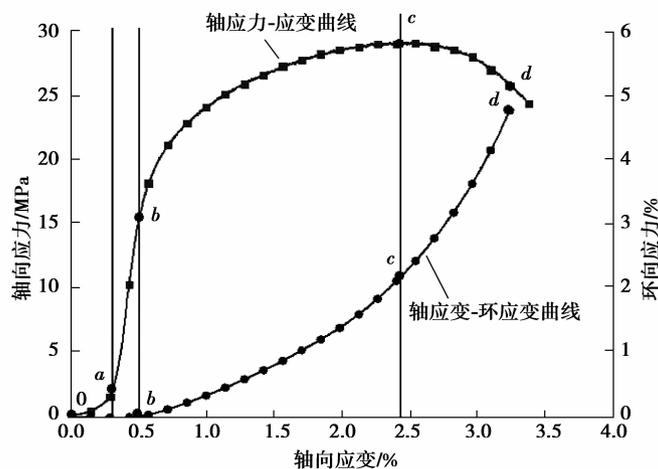


图 3 完整盐岩应力-应变曲线和轴应变-环应变曲线

Fig.3 Stress-strain curve and the axial strain-ring direction strain curve of intact salt rock

4 裂纹对盐岩强度和变形特征影响

4.1 裂纹倾角对盐岩强度和变形特征影响

表 3 给出了不同倾角预制裂纹盐岩试件单轴压缩下的力学参数。由表 3 可见, 裂纹倾角分别为 45° 、 60° 、 75° 的预制裂纹试件峰值应力分别为 26.39、28.80、25.59 MPa, 与完整盐岩试件的峰值应力 29.19 MPa 相比依次降低了 9.59%、1.34%、12.33%。由此来看, 不同倾角裂纹对盐岩试件的峰值强度有一定影响, 降低了试样的峰值强度值, 但降低量的多少与裂纹倾角大小并未呈现明显的线性关系, 而倾角为 60° 时强度降低量最少, 表明此角度裂纹对峰值影响较小, 对岩体稳定有利。

表 3 不同倾角裂纹盐岩单轴压缩试验力学参数

Table 3 Mechanical parameters of salt rock with prefab fissures of different fissure angles

编号	σ_{1n} /MPa	E /GPa	E_{50} /GPa	E_0 /GPa	ϵ_{1n} /%	ϵ_{3n} /%
PS6-1	29.19	8.66	3.06	1.19	2.46	2.26
PS1-1	26.39	7.20	2.58	0.93	2.84	2.47
PS2-1	28.80	5.95	3.98	0.88	3.26	2.59
PS3-1	25.59	7.62	3.38	1.13	2.27	2.53

从弹性模量变化来看, 45° 、 60° 、 75° 的裂纹盐岩弹性模量分别为 7.20、5.95、7.62 GPa, 比完整盐岩 8.66 GPa 分别降低了 16.90%、31.30%、12.00%。由此可见, 裂纹对盐岩的弹性模量有较大影响, 降低了试样的弹性模量, 但降低量的多少与裂纹倾角大小并不成明显的线性关系。

从变形模量来看, 45° 、 60° 、 75° 的裂纹盐岩比完整盐岩变形模量分别降低 21.85%、26.05%、5.04%, 可见, 裂纹对盐岩的变形模量有一定影响, 降低了试样的变形模量, 但降低量的多少与裂纹倾角大小并不成明显的线性关系。

从环向应变来看, 45° 、 60° 、 75° 的裂纹盐岩环向应变分别增加 9.29%、14.60%、11.95%, 由此可见, 预制裂纹等缺陷的存在增大了试样的环向变形。不同倾角裂纹盐岩的其他参数, 如 E_{50} 和 ϵ_{1n} , 相比完整盐岩有增加, 也有降低, 缺乏明显规律性。

图 4 给出了不同倾角预制裂纹盐岩试件轴向应力-应变曲线, 曲线附近分别标注了裂纹的倾角。从图中可以看出, 与完整盐岩单轴压缩类似, 裂纹盐岩单轴压缩也呈现压密阶段、弹性变形阶段、塑性变形阶段和破坏阶段等 4 个阶段。从轴向峰值应力可以明显看出, 不同倾角裂纹盐岩的峰值应力都有不同程度降低。从曲线的近似直线段斜率也可看出, 不同倾角裂纹盐岩的弹性模量都有不同程度降低。而峰值应力对应的应变有增有减, 没有明显的规律可循。从峰值应力前后曲线来看, 与脆性岩石曲线特征不同, 盐岩的峰值强度附近, 曲线基本都出现了屈服平台, 表明盐岩内部材料的屈服弱化变形趋于均匀化相对脆性岩石较好, 从试件的最终破坏形态中也可得到相应印证, 由于篇幅所限, 作另文分析。

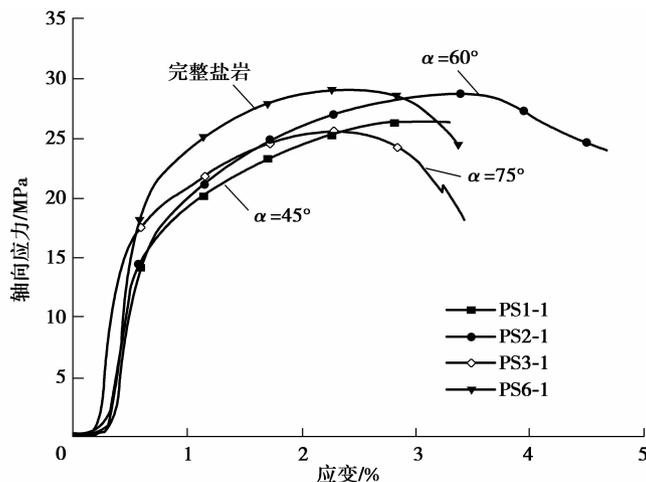


图 4 不同倾角裂纹盐岩应力-应变曲线

Fig.4 Stress strain curve of salt rock with different fissures angles

总之,不同倾角的预制裂纹对盐岩峰值强度有明显的弱化作用,降低了盐岩的弹性模量和变形模量,但是,由于试验条件所限,预制不同的倾角裂纹试件较少,裂纹倾角对力学参数的影响规律有待后续进一步研究。

4.2 裂纹长度对盐岩强度和变形特征影响

表 4 给出了不同长度预制裂纹盐岩试件单轴压缩下的力学参数。由表 4 可见,裂纹长度分别为 20、30、40 mm 的预制裂纹试件峰值应力分别为 28.80、27.74、27.34 MPa,与完整盐岩试件的峰值应力 29.19 MPa 相比依次降低了 1.34%、4.97%、6.34%。很明显,不同长度的裂纹对盐岩峰值强度的弱化作用不同,裂纹长度越长,弱化作用越大,试件强度降低量的多少与裂纹长度大小近似呈线性关系。

表 4 不同长度裂纹盐岩单轴压缩试验力学参数

Table 4 Mechanical parameters of salt rock with prefab fissures of different fissures length

编号	σ_{1n}/MPa	E/GPa	E_{50}/GPa	E_0/GPa	$\epsilon_{1n}/\%$	$\epsilon_{3n}/\%$
PS6-1	29.19	8.66	3.06	1.19	2.46	2.26
PS2-1	28.80	5.95	3.98	0.88	3.26	2.59
PS4-1	27.74	6.76	3.85	1.35	2.05	2.28
PS5-1	27.34	6.09	2.58	0.93	2.94	2.96

从弹性模量变化来看,20、30、40 mm 的裂纹盐岩弹性模量分别为 5.95、6.76、6.09 GPa,比完整盐岩 8.66 GPa 分别降低了 31.30%、21.94%、29.68%,裂纹不同长度与不同倾角对弹性模量弱化程度相比,长度对弹性模量的影响程度更大。但是,裂纹长度与弹性模量之间影响规律不明显,此特点与文献[21]对大理岩的研究结论较类似。不同长度裂纹盐岩的其他力学参数,如 E_{50} 、 E_0 、 ϵ_{1n} 和 ϵ_{3n} ,相比完整盐岩有增加,也有降低,缺乏明显规律性。

图 5 给出了不同长度预制裂纹盐岩试件轴向应力-应变曲线,曲线附近分别标注了裂纹的长度。从图中可以看出,与完整盐岩单轴压缩类似,裂纹的长短并不影响单轴压缩过程中呈现的压密阶段、弹性变形阶段、塑性变形阶段和破坏阶段等 4 个阶段。

从轴向峰值应力可以明显看出,不同长度裂纹盐岩的峰值应力都有不同程度降低。从曲线的近似直线段斜率也可看出,不同长度裂纹盐岩的弹性模量都有不同程度降低。从图中 PS4-1、PS5-1 曲线,可以看到,在弹性阶段结束后,曲线出现了明显的“凹”形波动,见图 5 中的放大部分。究其原因因为预制裂纹弹性阶段结束后,裂纹尖端处受到应力集中,首先屈服弱化,产生塑性变形,预制裂纹逐渐闭合。裂纹闭合后,试件的整体承载力仍未达到极限,承受荷载继续增加,达到峰值强度。未出现脆性断裂而产生的“应力降”,这一特点也为盐岩作为储气库的优势之一。而其它 3 个 20 mm 预制裂纹试件未出现明显“凹”形波动估计是因裂纹长度较短,影响较小。

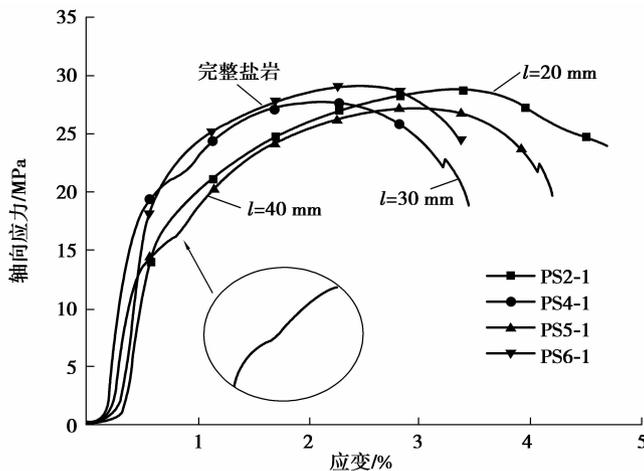


图 5 不同长度裂纹盐岩应力应变曲线

Fig.5 Stress strain curve of salt rock with different fissures length

总之,不同长度的预制裂纹对盐岩峰值强度有明显的弱化作用,裂纹越长,弱化作用越大,峰值强度降低量越多;不同长度裂纹降低了盐岩的弹性模量;预制裂纹盐岩受荷载作用未出现沿预制裂纹方向的扩展贯通,从断口形貌中也可得到印证,由于篇幅所限,作另文分析。

5 盐岩损伤过程中的能量特征分析

5.1 岩石损伤的能量耗散理论

一个单位岩体单元受外力作用,内部产生损伤,而外部表现产生变形,忽略该过程中的热交换,则外力做功即等于输入单位岩体的总能量 U ,根据热力学第一定律,可得

$$U = U_d + U_e, \quad (7)$$

式中: U_d 为单元耗散能; U_e 为单元可释放弹性应变能。总能量、单元耗散能和单元可释放弹性应变能之间关系如图 6 所示,图中 E_i 为盐岩卸载弹性模量,阴影部分面积为可释放弹性应变能。

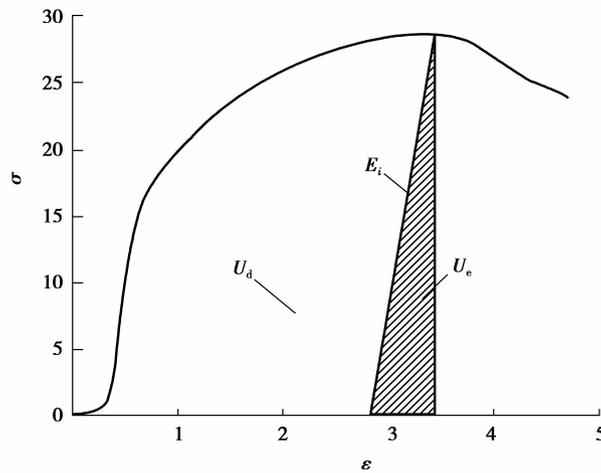


图 6 单位体积岩石中不同能量量值关系

Fig.6 Quantitative relationship between different energy of unit rock

主应力空间中岩体单元各部分能量^[22]可表示为

$$U = \int_0^{\epsilon_1} \sigma_1 d\epsilon_1 + \int_0^{\epsilon_2} \sigma_2 d\epsilon_2 + \int_0^{\epsilon_3} \sigma_3 d\epsilon_3, \quad (8)$$

$$U_e = \frac{1}{2} \sigma_1 \epsilon_{1e} + \frac{1}{2} \sigma_2 \epsilon_{2e} + \frac{1}{2} \sigma_3 \epsilon_{3e}, \quad (9)$$

$$\epsilon_i^e = \frac{1}{E_i} [\sigma_i - \nu_i (\sigma_j + \sigma_k)], \quad (10)$$

式中: $\sigma_i, \sigma_j, \sigma_k$ ($i, j, k = 1, 2, 3$) 为主应力; $\epsilon_i, \epsilon_{ie}$ ($i = 1, 2, 3$) 分别为主应力方向上的总应变和弹性应变; ν_i 为泊松比。

将式(9)代入式(8),考虑损伤沿主应力方向的平均效应,并进行适当简化可得^[23]

$$U_e = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\bar{\nu}(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)], \quad (11)$$

式中:平均值 $\bar{E}, \bar{\nu}$ 可通过岩石单向循环加卸载试验确定。

根据文献[24]所做盐岩加卸载试验,盐岩初始弹性模量与卸载弹性模量相接近,为方便计算,则式(10)改为

$$U_e = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)], \quad (12)$$

式中, E 为岩石初始弹性模量。

对于单轴压缩试验,仅有轴向应力 σ_1 对试件做功,因此,总能量、弹性应变能和耗散能分别表示为

$$U = \int_0^{\epsilon_1} \sigma_1 d\epsilon_1 = \sum_{i=1}^m \frac{1}{2} (\sigma_{1i+1} + \sigma_{1i}) (\epsilon_{1i+1} - \epsilon_{1i}), \quad (13)$$

$$U_e = \frac{\sigma_1^2}{2E}, \quad (14)$$

$$U_d = U - U_e = \int_0^{\epsilon_1} \sigma_1 d\epsilon_1 - \frac{\sigma_1^2}{2E}, \quad (15)$$

式中: U 的单位为 MJ/m^3 ,与应力单位 MPa 相等同。

5.2 盐岩损伤破坏过程的能量特征

根据式(13)~(15),利用应力-应变曲线,对完整和裂纹盐岩的试验结果进行计算,可得到不同应力水平的耗散能和弹性应变能,得出数据见表 5,表中仅给出了峰值应力处数据结果。

由表 5 中数据计算可得,裂纹盐岩试样在峰值应力处的总应变能、弹性应变能和耗散应变能平均值,分别为 528.92、55.86、473.06 kJ/m^3 ,完整岩样分别为 522.7、49.20、473.50 kJ/m^3 。裂纹盐岩可释放弹性应变能与总应变能之比 U_e/U 为 10.7%,耗散应变能与可释放弹性应变能的之比 U_d/U_e 为 8.47。完整盐岩可释放弹性应变能与总应变能之比 U_e/U 为 9.41%,耗散应变能与可释放弹性应变能的之比 U_d/U_e 为 9.62。表明无论是完整盐岩还是裂纹盐岩,外力做功绝大部分(约 90%左右)使盐岩内部产生损伤和塑性变形,只有极少(约定 10%左右)使盐岩产生可释放的弹性应变能。这也印证了在盐岩单轴压缩过程中,因为有少量的弹性应变能,不会出现类似脆性岩石急剧性的应力释放的“岩爆”现象。

表 5 盐岩单轴压缩峰值应力处对应的应变能

Table 5 Strain energy at peak stress point under uniaxial compression

编号	U/kPa	U_e/kPa	$(U_e/U)/\%$	U_d/kPa
PS1-1	535.3	48.36	9.03	486.94
PS2-1	681.7	69.70	10.22	612.00
PS3-1	429.2	42.97	10.01	386.23
PS4-1	417.4	56.92	13.64	360.48
PS5-1	581.0	61.37	10.56	519.63
PS6-1	522.7	49.20	9.41	473.50

为分析裂纹盐岩损伤破坏过程中的能量特征,将试样 PS4-1 破坏全过程的单元总能耗、单元弹性应变能、单元耗散能随应变变化曲线绘于图 7 中。通过分析图 7 可发现,盐岩损伤至破坏过程,外力功(总能耗)在各个阶段有不同的能耗特征:1)压密阶段。由于盐岩的变形性能较强,压密阶段与整个破坏过程相比,时间较短,应变较小,加之外荷载较小, U_d 等 3 条发展曲线几乎为接近 0 的水平直线,因此,总能耗比较低,此部分能耗主要促使试样中原生裂纹、缺陷的密实、闭合。2)弹性阶段。单元总能耗主要在于试样产生的弹性变形,外力功转化为试样可释放的弹性应变能, U 和 U_e 发展曲线几乎重合,而 U_d 发展曲线维持微小幅度增加。3)塑性阶段。试样不断承受外力功,单元总能耗 U 发展曲线基本呈现线性增加趋势,单元耗散能 U_d 呈现快速增加态势,耗散能的大幅度增加使得塑性阶段裂纹大量萌生、聚集,在峰值应力前成核、贯通。可释放弹性应变能 U_e 在经历弹性阶段的能量储存后保持微弱增长,在峰值应力附近,弹性应变能达到最大值。4)破坏阶段。此阶段由于试样仍然受到外荷载作用,因此,单元总能耗 U 发展曲线仍然保持增加态势,单元耗散能 U_d 的增加使裂纹逐步扩展,引起破坏界面的错动、滑移,耗散能在总能耗中的占比逐渐增大,弹性应变能 U_e 呈现逐渐减少趋势。

6 结 论

1)通过与完整盐岩试件相比较,不同倾角裂纹降低了试样的峰值强度值,但降低量的多少与裂纹倾角大小并未呈现明显的线性关系,而倾角为 60° 时强度降低量最少,表明此角度裂纹对峰值影响较小,对岩体稳定

有利。不同倾角裂纹对盐岩的弹性模量和变形模量有较大影响,降低了试样的弹性模量和变形模量。

2)不同长度的预制裂纹对盐岩峰值强度有明显的弱化作用,裂纹越长,弱化作用越大,峰值强度降低量越多;应力-应变曲线出现的明显“凹”形波动表明,单轴受压过程中预制裂纹首先缓慢闭合;不同长度裂纹降低了盐岩的弹性模量;预制裂纹盐岩受荷载作用未出现沿预制裂纹方向的扩展贯通。

3)裂纹盐岩可释放弹性应变能与总应变能之比 U_e/U 为 10.7%,完整盐岩可释放弹性应变能与总应变能之比 U_e/U 为 9.41%。外力做功绝大部分使盐岩内部产生损伤和塑性变形,只有少量使盐岩产生可释放的弹性应变能。因此,在盐岩单轴压缩过程中,因为有少量的弹性应变能,不会出现类似脆性岩石急剧性的应力释放的“岩爆”现象,这一特征对储库安全较为有利。

4)各种能量与应变关系曲线表现出阶段特征: U_d 发展曲线在弹性阶段维持微小幅度增加,而在弹性阶段总能耗主要转化为弹性应变能;在塑性阶段, U 发展曲线基本呈现线性增加趋势, U_d 呈现快速增加态势, U_e 在保持微弱增长,在峰值应力附近,弹性应变能达到最大值;在破坏阶段, U 发展曲线仍然保持增加态势,弹性应变能 U_e 呈现逐渐减少。

5)盐岩单轴压缩呈现压密阶段、弹性变形阶段、塑性变形阶段和破坏阶段等 4 个阶段,与脆性岩石不同的是盐岩的弹性阶段较短,而塑性阶段较长,在盐岩的峰值强度附近,曲线基本都出现了屈服平台,试件产生较大的塑性变形。

最后,需要说明的是,受到试验量和一致性的限制,文中的观点和结论仍是初步的。试验研究结果对裂纹盐岩的强度和变形特征提出了有价值的认识,分析了预制裂纹对盐岩单轴强度参数的影响规律。在后续的工作中,计划开展预制裂纹盐岩三轴压缩试验,以求为盐穴储库建设提供更多的参考依据。

致谢:本文在试验过程中得到山东科技大学研究生院王斌副教授、矿业学院陈绍杰副教授、硕士研究生王怀远的大力支持,特此致谢!

参考文献:

- [1] Liang W G, Zhao Y S, Xu S G, et al. Effect of strain rate on the mechanical properties of salt rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48(1): 161-167.
- [2] Amadei B, Pan E. Gravitational stresses in anisotropic rock masses with inclined strata[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1992, 29(3): 225-236.
- [3] Lavrov A, Vervoort A, Filimonov Y, et al. Acoustic emission in host-rock material for radioactive waste disposal: comparison between clay and rock salt[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2002, 61(4): 379-387.
- [4] Fuenkajorn K, Sriapai T, Samsri P. Effects of loading rate on strength and deformability of Maha Sarakham salt[J]. Engineering Geology, 2012, 135(03): 10-23.
- [5] Wasantha P L P, Ranjith P G, Shao S S. Energy monitoring and analysis during deformation of bedded-sandstone: Use of acoustic emission[J]. Ultrasonics, 2014, 54(1): 217-226.
- [6] Ma L, Liu X, Wang M, et al. Experimental investigation of the mechanical properties of rock salt under triaxial cyclic loading[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, 62(4): 34-41.
- [7] Fuenkajorn K, Phueakphum D. Effects of cyclic loading on mechanical properties of Maha Sarakham salt[J]. Engineering Geology, 2010, 112(4): 43-52.
- [8] Singh T N, Ray S K, Singh D P. Effect of uniaxial cyclic compression on the mechanical behavior of rocks[J]. Indian J Eng Mater Sci, 1994, 1(2): 118-20.
- [9] 王安明, 杨春和, 黄诚, 等. 层状盐岩力学和变形特性数值试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(7): 2173-2178.
WANG Anming, YANG Chunhe, HUANG Chen, et al. Numerical experiment study of deformation and mechanical properties of layered salt rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(7): 2173-2178. (in Chinese)
- [10] 姜德义, 邱华富, 易亮, 等. 大尺寸型盐造腔相似试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(09): 1746-1754.
JIANG Deyi, QIU Huafu, YI Liang, et al. Similar experimental study of cavity building using large-size molded salt rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(09): 1746-1754. (in Chinese)
- [11] Alkan H, Cinar Y, Pusch G. Rock salt dilatancy boundary from combined acoustic emission and triaxial compression tests[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, 44(1): 108-119.
- [12] 任松, 白月明, 姜德义, 等. 周期荷载作用下盐岩声发射特征试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(6): 1613-1618, 1639.

- REN Song, BAI Yueming, JIANG Deyi, et al. Experimental research on acoustic emission property of salt rock under cyclic loading[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(6):1613-1618, 1639. (in Chinese)
- [13] 王利,毛原春,叶金生,等. 基于微缺陷成核序列的岩石微裂纹生长和损伤演化模型[J]. *工程力学*, 2013, 30(8):278-286.
WANG Li, MAO Yuanchun, YE Jinsheng, et al. Models for microcracks extension and damage evolution based on number series of microdefects nucleation[J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(8):278-286. (in Chinese)
- [14] 许江,程立朝,谭皓月,等. 原生裂纹对煤岩剪切破坏宏观演化规律的影响研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(1):33-38.
XU Jiang, CHENG Lichao, TAN Haoyue, et al. Effects of original cracks on macro-meso evolution law of coal shear failure[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(1):33-38. (in Chinese)
- [15] 裴建良,刘建锋,左建平,等. 基于声发射定位的自然裂隙动态演化过程研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(1):676-704.
PEI Jianliang, LIU Jianfeng, ZUO Jianping, et al. Investigation on dynamic evolution process of natural fractures based on acoustic emission position[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(1):676-704. (in Chinese)
- [16] 任利,谢和平,谢凌志,等. 基于断裂力学的裂隙岩体强度分析初探[J]. *工程力学*, 2013, 30(2):156-162.
REN Li, XIE Heping, XIE Lingzhi, et al. Preliminary study on strength of cracked rock specimen based on fracture mechanics[J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(2):156-162. (in Chinese)
- [17] 杨圣奇. 断续三裂隙砂岩强度破坏和裂纹扩展特征研究[J]. *岩土力学*, 2013, 34(1):32-39.
YANG Shengqi. Study of strength failure and crack coalescence behavior of sandstone containing three pre-existing fissures[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(1):32-39. (in Chinese)
- [18] 李林,陈结,姜德义,等. 单轴条件下层状盐岩的表面裂纹扩展分析[J]. *岩土力学*, 2011, 32(5):1394-1398.
LI Lin, CHEN Jie, JIANG Deyi, et al. Analysis of surface crack growth in layered salt rock under uniaxial compression[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(5):1394-1398. (in Chinese)
- [19] 杨春和,马洪岭,刘建锋. 循环加、卸载下盐岩变形特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2009, 30(12):3562-3568.
YANG Chunhe, MA Hongling, LIU Jianfeng. Study of deformation of rock salt under cycling loading and unloading[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(12):3562-3568. (in Chinese)
- [20] 刘建锋,边宇,郑得文,等. 三轴应力状态下盐岩强度分析探讨[J]. *岩土力学*, 2014, 35(4):919-925.
LIU Jianfeng, BIAN Yu, ZHENG Dewen, et al. Discussion on strength analysis of salt rock under triaxial compressive stress[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(4):919-925. (in Chinese)
- [21] 杨圣奇,戴永浩,韩立军,等. 断续预制裂隙脆性大理岩变形破坏特性单轴压缩试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(12):2392-2402.
YANG Shengqi, DAI Yonghao, HAN Lijun, et al. Uniaxial compression experimental research on deformation and failure properties of brittle marble specimen with pre-existing fissures[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(12):2392-2402. (in Chinese)
- [22] Solecki R, Conant R J. *Advanced mechanics of materials*[M]. London: Oxford University Press, 2003:74-82.
- [23] 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 Heiping, 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. (in Chinese)
- [24] 王伟超,刘希亮,张五交,等. 不同应力路径下盐岩破坏声发射时序特征研究[J]. *实验力学*, 2015, 30(3):348-354.
WANG Weichao, LIU Xiliang, ZHANG Wujiao, et al. Study on acoustic emission timing features of salt rock under different uniaxial compressive loadings[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2015, 30(3):348-354. (in Chinese)