

盐岩的压剪疲劳特性与位错损伤研究

姜德义¹, 范金洋¹, 陈 结^{1,2}, 李 林¹, 任 松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: 开展不同剪切角度的压剪实验和疲劳实验, 研究压剪作用下盐岩的力学特性和晶体位错特性, 基于损伤力学观点, 建立以位错为度量指标的损伤关系模型。得到的主要结论有: (1) 大于 45° 角剪切时, 盐岩晶体位错的滑移阻力较小, 盐岩抗变形能力、峰值应力和最大变形量均随着剪切角度的增大而减小。裂纹以剪切面附近扇形裂纹发育为主。(2) 疲劳寿命与循环荷载的上限应力水平相关。剪切角度不同时, 若应力水平相同, 则其疲劳寿命(循环数)基本相同; 若应力大小相同, 则剪切角度越大, 疲劳寿命越短。(3) 变向剪切对盐岩的疲劳寿命影响巨大, 使疲劳寿命下降 90% 以上。(4) 盐岩疲劳裂纹的成核和位错的不断挤入、挤出有关, 裂纹扩展是多滑移系交替滑移的结果。建立基于位错理论的盐岩损伤模型, 使损伤能从本质上表达盐岩的破坏过程。疲劳损伤越大盐岩的承载能力下降越明显。

关键词: 岩石力学; 盐岩; 压剪; 位错; 疲劳损伤; 变向

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2015)05-0895-12

COMPRESSION-SHEAR FATIGUE AND DISLOCATION DAMAGE OF SALT ROCK

JIANG Deyi¹, FAN Jinyang¹, CHEN Jie^{1,2}, LI Lin¹, REN Song¹

(1. State Key Laboratory for the Coal Mine Disaster Dynamics and Controls, 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: The tests at different shear angles and the fatigue tests were carried out in order to study the mechanical properties under compression-shear and the crystal dislocations characteristics of salt rock. A dislocation-damage relationship was established based on the damage mechanics. The main conclusions were as follows. When the shear angle was larger than 45°, the slip resistance of the crystal dislocation of salt rock was relatively smaller, so the deformation resistance, the peak stress and the maximum deformation of salt rock decreased with the increasing of shear angle. The fan-shaped growth crack around the shear surface was dominant. The fatigue life was associated with the upper limit of cyclic stress level. For the different shear angles, if the stress level was the same, the fatigue life was largely the same. If the stress value was the same, the greater the angle, the shorter the fatigue life. The process of shearing with varying shear direction influenced greatly the fatigue life of rock salt, with more than 90% of decrease. The formation of the fatigue cracks of salt rock was related to the movement of dislocation squeezing. The crack growth was the result of alternating slippage for multiple slip systems.

Key words: rock mechanics; salt rock; compression-shear; dislocation; fatigue damage; varying shear direction

收稿日期: 2014-08-11; **修回日期:** 2014-10-18

作者简介: 姜德义(1962-), 男, 1982年毕业于重庆大学采矿工程专业, 现任重庆大学资源与环境学院院长, 主要从事矿业安全、岩土力学方面的研究工作。E-mail: deyj@cqu.edu.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.1098

1 引言

地下岩石工程的受力状态是复杂的。盐岩储气库围岩往往会受到压剪应力和张拉应力等多种复合应力的作用^[1-2]。储气库运营过程中,盐岩在周期载荷作用下,晶粒结构缺陷(如位错、空位、间隙原子和杂质原子等),容易造成盐岩内部结构不协调变形,诱致损伤衍生发展^[3-6]。如果不对这些行为加以研究、控制,最终将导致储库失稳、漏泄气等严重事故的发生。我国在储气库建设方面刚刚开始,需要加强对盐岩储气库的安全运营和稳定性等关键问题的研究。

针对疲劳损伤,已有很多学者做过这方面的理论和实验研究^[7-12]。但现有的关于疲劳损伤的理论大多基于宏观断裂力学,对一些行为无法从本质上解释。借助位错理论开展岩石损伤力学研究,可以作为向上联系应变梯度塑性理论和经典塑性力学,向下联系纳米力学的桥梁,从而从本质上揭示材料的塑性变形行为和疲劳裂纹扩展模式。

位错的形核、运动和演化与晶体内部的塑性变形、断裂和剪切失稳等失效过程密切相关。位错的存在和运动是裂纹尖端塑性变形的根本原因,并决定着裂纹扩展的韧脆性行为。位错理论作为研究损伤的一种有效方法^[13-15],对盐岩更深一步研究势必有帮助。早在 20 世纪 60 年代,赵敬世^[15]在 NaCl, KCl, 锗, 铂等晶体中发现了晶体位错现象。位错理论已在金属损伤和半导体损伤方面得到广泛的应用^[16-20]。同时,位错在盐类晶体内也真实存在,并影响着损伤的演化发展。时下国外一些学者针对岩石类晶体材料位错损伤的研究成果也有报道,近期开展了针对花岗岩、橄榄石中位错的扩散爬移等行为的研究^[21-23],但是盐岩压剪特性下的位错损伤仍然未有涉及。盐岩由于其独特的软岩特性,以往的研究成果不一定能够直接适用。因此,本文就其位错损伤开展研究,并依托盐岩的压剪力学术特性,建立储库围岩的压剪位错损伤模型。通过这些研究,可以为储气库的围岩稳定性和损伤控制,尤其大埋深条件下的围岩问题提供重要的参考意义。

2 实验条件及方法

2.1 实验材料

实验选用较高纯度(NaCl 纯度在 96%以上)的天

然盐岩。该盐岩取自巴基斯坦喜马拉雅山区,埋藏 800 ~ 1 000 m,呈白色或浅红色。其中含有少量 Na₂SO₄, MgCl₂ 等杂质成分。按照岩石力学实验标准和规范,加工成标准的 50 mm 正方体盐岩试样。

为减少杂质对盐岩损伤演化的影响,保证盐岩试样岩性的稳定、可靠,降低其离散性,选择颜色尽量一致、含杂质成分尽量相近,裂纹长度、数量和大小差异较小的盐岩试样进行加工。加工完成的试样的端面平整度尽量保证在±0.02 mm 以内,以减小端部效应。通过高倍光学显微镜观察试样表面,较光滑、平整,未发现明显的突起结晶体,说明试样打磨已非常平整。有小的空洞和蚀坑,说明盐岩内部本身存在结晶缺陷,含有一些孔隙。加工完成试样和试样表面放大图(放大 900 倍)如图 1 所示。

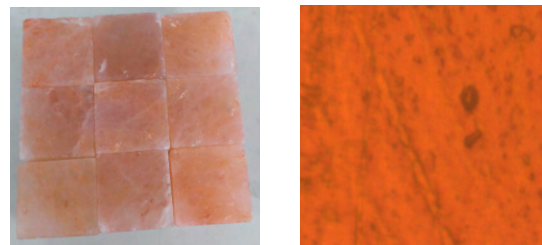


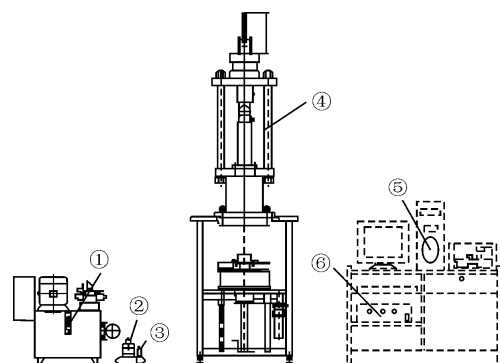
图 1 试样及其表面放大图

Fig.1 Specimens and the magnified surface

2.2 实验条件

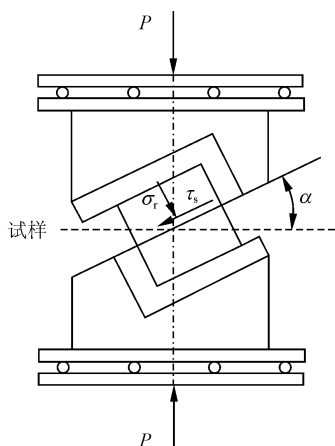
实验在煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室进行,加载采用高温盐岩试验机。试验机为自动控制电液伺服加载系统,最大轴向力 400 kN,轴向力示值精度±0.8%,最大加载速率调控范围 0.1 ~ 500.0 mm/min。变角剪切夹具可对边长为 50 cm 的立方体试样做不同倾角(25 °~ 65 °)的剪切实验。

观察用显微镜为中国产偏光高清显微镜,为数字化智能显微镜,操作方便,结果可靠。放大倍数 100 ~ 1 000 倍。实验所涉及设备如图 2 所示。

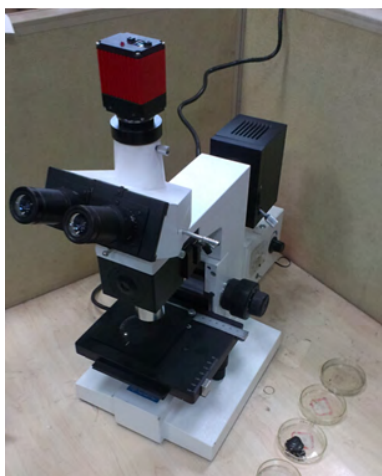


—伺服液压站; —三轴室过滤器; —围压传感器; —实验主机; —计算机测量与控制系统; —电气系统电控箱

(a) 试验机结构示意图



(b) 压剪模具示意图



(c) 高清显微镜

图 2 实验设备

Fig.2 Test instruments

实验时，不对试验机和试样进行温度控制，记录当时实验室的气温，保证每次实验时温度为 20 ± 2 。

2.3 实验程序

目前我国储气库埋深大多在 800 ~ 1 000 m，潜江地区拟建库深达 2 000 m(运行气压 20 MPa)，围岩所受竖向应力可达 20 ~ 30 MPa 以上，储气库运行压力 5 ~ 18 MPa，加上水平地应力作用，使围岩在偏应力作用下产生了巨大的剪切应力。过大的剪切和压缩组合应力容易诱发储库的失稳。实验方案以运行储库围岩应力状态为参考，研究不同层位盐岩所受压剪应力下的力学特性。实验方案为：

(1) 压剪实验：以 2 kN/s 的加载速率，将方形盐岩试样加载至破坏；至少进行 3 次重复实验。取 3 个正确实验的平均值作为分析研究对象。压剪实验中，以剪切力作为试样主要的承受力是理所应当的，同时考虑实验条件所限，选取 45° ， 55° ， 65°

角度分别开展实验。

(2) 疲劳实验：按照压剪实验的数据，设计循环压力的上、下限应力水平(应力水平为即时应力大小和直接压剪实验峰值强度的比值)。上限应力水平为 85%，下限应力水平基本为 0。首循环按照 2 kN/s 的加载速率，次循环及以后循环按照 5 kN/s 的加载速率循环加、卸载至试样破坏。

(3) 变向疲劳实验：采用方案(2)的方法和实验水平，在完成每个循环后，调整压剪方向(前后旋转 180° ，即反向加载)，继续下一个循环的加载。

(4) 阶段损伤实验：根据方案(2)实验破坏时的循环数，取循环总数的 1/4，2/4，3/4，确定不同的疲劳损伤程度。将 3 个试样分别加载 1/4，2/4，3/4 的循环数，放置一定时间后，加载至破坏。所做实验及试样编号如表 1 所示。

表 1 试样编号

Table 1 Numbering of specimens

实验类型	试样编号	实验条件		
		剪切角度/ $(^\circ)$	上限综合应力/MPa	加载速率/ $(\text{kN} \cdot \text{s}^{-1})$
直接压剪	JQ-45	45	-	2
	JQ-55	55	-	2
	JQ-65	65	-	2
疲劳特性 1	XH-45-1	45	40.5	2, 5
	XH-55-1	55	19.4	2, 5
	XH-65-1	65	10.5	2, 5
疲劳特性 2	XH-45-2	65	19.4	2, 5
	BH-45	45	40.5	2, 5
	BH-55	55	19.4	2, 5
变向疲劳	BH-65	65	10.5	2, 5
	JD-45-1/4	45	40.5	2, 5
	JD-45-2/4	45	40.5	2, 5
阶段损伤	JD-45-3/4	45	40.5	2, 5
	JD-55-1/4	55	19.4	2, 5
	JD-55-2/4	55	19.4	2, 5
	JD-55-3/4	55	19.4	2, 5
	JD-65-1/4	65	10.5	2, 5
	JD-65-2/4	65	10.5	2, 5
	JD-65-3/4	65	10.5	2, 5

3 实验结果与分析

3.1 不同压剪角度盐岩的变形特征

从岩石的变形特征分析，盐岩的压剪应力-应变曲线可以分为压密阶段、弹性阶段、塑性和屈服阶段以及破坏后阶段，如图 3 所示。伴随着盐岩的

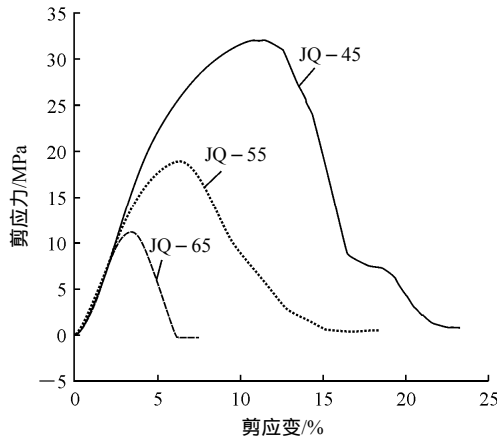
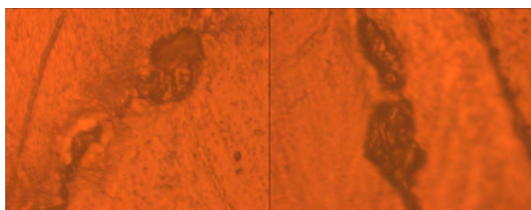
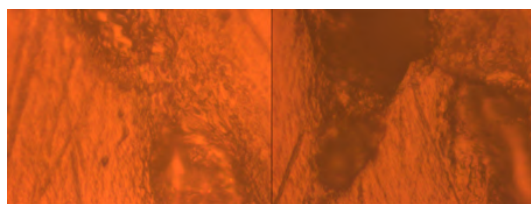


图3 剪应力-剪应变曲线
Fig.3 Shear stress-shear strain curves

变形，位错的行为如下：(1) 压密阶段，由于此时外力较小，盐岩内部缺陷(如天然位错、孔隙等)周围不足以形成较大的应力集中。缺陷周边仍然保持完整性，只是孔隙、裂隙的空间被一定程度地压缩。(2) 弹性阶段是晶粒间和晶粒内部离子间相互压缩(平衡距离范围附近)的变形过程。这个过程以离子内部的距离变化为主，吸收了系统的压缩能量，是可逆的。前2个阶段基本没有新位错的形成和滑移。(3) 塑性和屈服阶段，原生缺陷周边区域应力集中程度达到极限水平，空位和间隙原子演化成位错。位错以不同的增殖模式衍生出新的位错，位错滑移至障碍处，被阻碍堆积。随着堆积位错数量的增加，裂纹逐渐萌生、发育。若位错在晶界处堆积，将会导致晶粒的连接被切断，同样产生裂纹。原生缺陷和位错障碍在空间上具有随机性，因此，这些裂纹均是随机出现，但是受剪切应力带的影响，这些裂纹大部分分布在剪切滑移面的周边。图4(a)为滑移



(a) 裂纹萌生



(b) 裂纹贯通

图4 裂纹放大图(900倍)

Fig.4 Enlarged figures of cracks(×900)

面附近某处诞生的新裂纹。新裂纹在堆积位错的集中应力作用下不断生长，随着裂纹的生长，位错逐渐被消化。裂纹与位错的这种相互作用，使裂纹间逐渐连接贯通，形成较深的贯通裂纹，图4(b)为裂隙贯通时的情形，并伴随着盐岩试样的屈服。(4) 屈服后阶段，虽然应力逐渐减小，但局部应力集中并未消失。在集中应力作用下，位错与裂纹继续相互作用，各条贯通裂纹间又相互交合，并最终将试样沿剪切滑移面割裂。

剪切滑移前一要克服黏聚力，二要克服剪切面上的摩擦力。不同的压剪角度使岩石所受压缩力和剪切力组合的不同。剪切面上所受的正应力越大，试样被剪切破坏前剪切面上所能承受的剪应力也越大。不同角度实验的剪切力和压缩力按下式计算：

$$\left. \begin{aligned} \tau &= \frac{P}{A}(\sin \alpha - f \cos \alpha) \\ \sigma &= \frac{P}{A}(\cos \alpha - f \sin \alpha) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： P 为竖向载荷； A 为试样剪切破坏面积； α 为试样放置角度； f 为剪切压模的摩擦因数，滚动摩擦与滚轴的数量和滚轴半径有关。通过实验结果计算，不同角度剪切实验的剪应力和正应力及主要参数如表2所示。

表2 主要力学参数
Table 2 Main mechanical parameters

剪切角度/(°)	峰值应变	最大荷载/kN	峰值剪应力/MPa	峰值正应力/MPa	变形模量/MPa
45	0.108 8	113	31.96	31.96	647.47
55	0.064 7	57	18.68	13.08	499.03
65	0.033 5	32	11.24	5.24	394.06

表2中，峰值应变是剪切实验中盐岩受正应力和剪应力综合作用下的综合变形，变形模量是岩石在弹性段的综合应力除以综合应变的结果。通过分析发现，不同剪切角度对位错行为、裂纹形态和剪切破坏过程的影响主要体现在以下几个方面：

(1) 初始压密阶段，岩石抗剪切能力低于抗压能力。随着剪切角度的增大，剪切分力大于法向分力，试样平行于剪切面的方向优先被压密。且剪切角度越大，被压密得越早，表现出的压密段就越短。

(2) 弹性阶段，岩石受不同压剪组合力时，岩石的变形能力和抵抗变形的能力均会发生变化。由表2可以发现，随着角度的增大，盐岩受法向应力

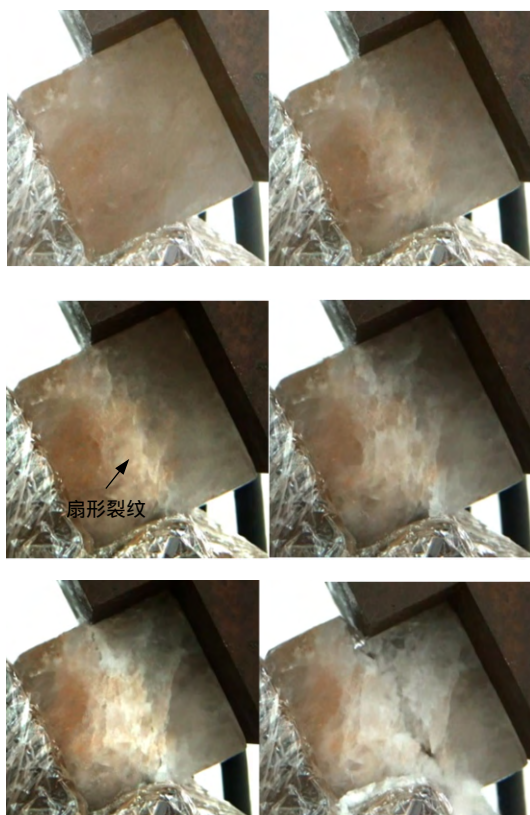
的成分比重在减小，其承载能力(即承受的最大荷载)在减小，抵抗变形的能力(即变形模量)也在减小。

(3) 塑性和屈服阶段，相比于直剪实验，压剪实验由于法向正应力的存在，造成位错滑移阻力增大，同时也使盐岩晶粒之间相互压紧，位错能够更容易突破晶界障碍，继续滑移，增加了滑移距离，增大了材料的塑性变形。因此，盐岩试样在压剪实验中，剪切角度越小，塑性变形越大，屈服应力、峰值应力越大。

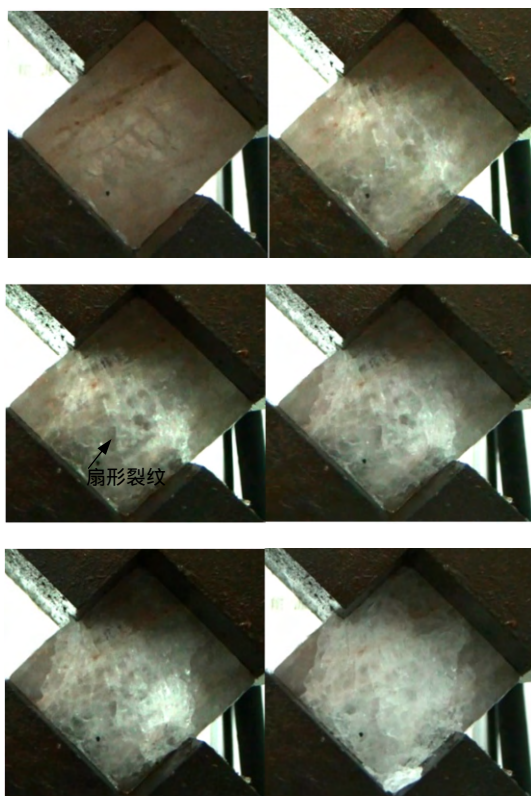
(4) 如图 5 所示，盐岩进入塑性阶段后，剪切面两端先出现沿剪切面的一些扇形裂纹，并逐步延伸发展，且与剪切面夹角越小的裂纹优势发展趋势越明显，扩展得越长、越远。随着应力的增大，中心区域也产生了一些裂纹，并向两边发育。对比不同角度的压剪裂纹，发现剪切角度越大，扇形区域的角度越小，裂纹间的优势趋势越明显。



(b) 55 度压剪破坏过程



(c) 65 度压剪破坏过程



(a) 45 度压剪破坏过程

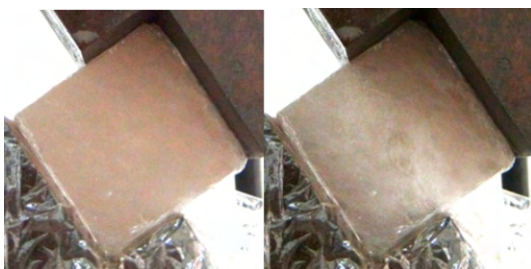


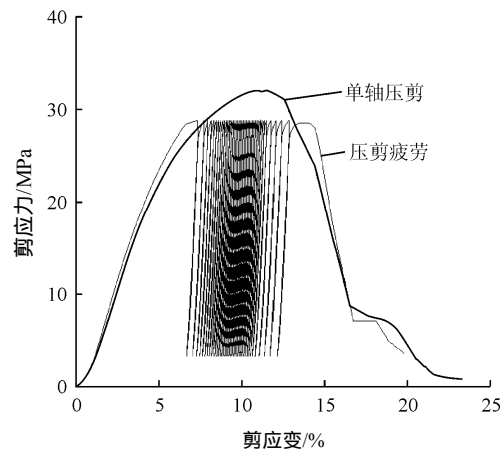
图 5 裂纹宏观发育过程

Fig.5 Macroscopic development process of cracks

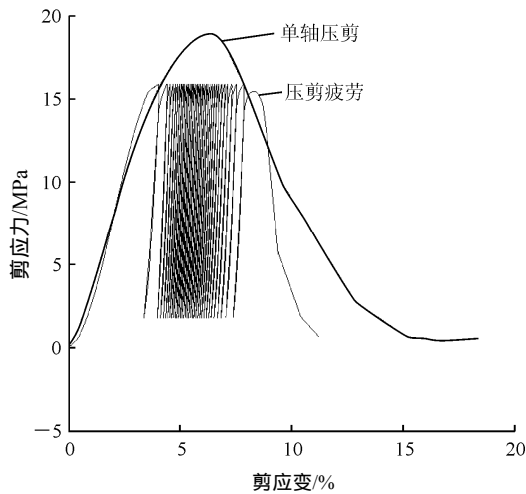
3.2 不同角度的盐岩疲劳变形特征

岩石的疲劳破坏应力-应变曲线一般要经历先疏后密，最后再疏至破坏的模式，通过观察发现，盐岩同样具有相似的模式。对比盐岩压剪曲线和疲劳特性曲线(见图 6)发现，盐岩的疲劳破坏同样受控于全应力-应变曲线，这一规律并未因剪切角度的不同而改变。

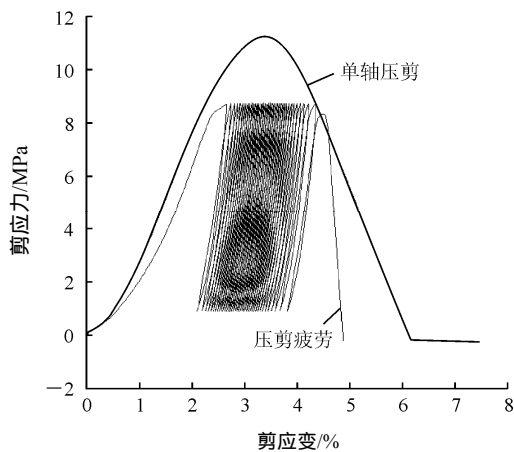
(1) 若剪切角度不同，应力上限水平(85%)相



(a) XH-45-1



(b) XH-55-1



(c) XH-65-1

图6 盐岩压剪疲劳特性曲线

Fig.6 Characteristic curves of shear fatigue

同时,盐岩所经历的循环数基本相同,如表3所示。但是由于不同角度的影响,不同角度的压剪疲劳特性仍然呈现出了一些不同的特征。

疏密程度不同,即残余变形不同:每个循环都经历了加载和卸载,但是加载线段和卸载线段总

表3 残余变形

Table 3 Residual deformations

剪切角度/(°)	最大残余变形/%	疲劳寿命	平均残余变形/%	累计残余变形/%
45	5.565	41	0.456	18.686
55	3.006	35	0.274	9.590
65	1.505	40	0.107	4.288

是不能完全重合,每个循环总是“多了”一些变形,即为残余变形。残余变形能够反映岩石在疲劳循环中的损伤程度。由表3可知,剪切角度越大,残余变形越小,造成疲劳特性曲线也越密。

裂纹形态:盐岩的裂纹一部分来自于塑性段位错堆积产生的裂纹,这与压剪形成的裂纹类似;另一部分来自于疲劳裂纹特有的成型机制。不同方向上的位错不断地在障碍高密度处堆积,形成多滑移系交叉的情形。在循环力作用下位错层频繁挤入、挤出,从而形成裂纹。这些裂纹容易在晶界或者夹杂物处成核。裂纹成核以后,在循环荷载作用下,前端各滑移系交替滑移引起裂纹扩展,深度加深,长度延长。疲劳裂纹相对于压剪裂纹,主裂纹的优势趋势更加明显。而且优势程度随角度的增大而增大。

(2) 若剪切角度不同,应力上限大小(均为19.4 MPa)相同时,盐岩的疲劳特性差异巨大。对比图7中不同剪切角度下的盐岩疲劳特性曲线可以发现,随着角度的增加,盐岩的疲劳寿命明显缩短。45°

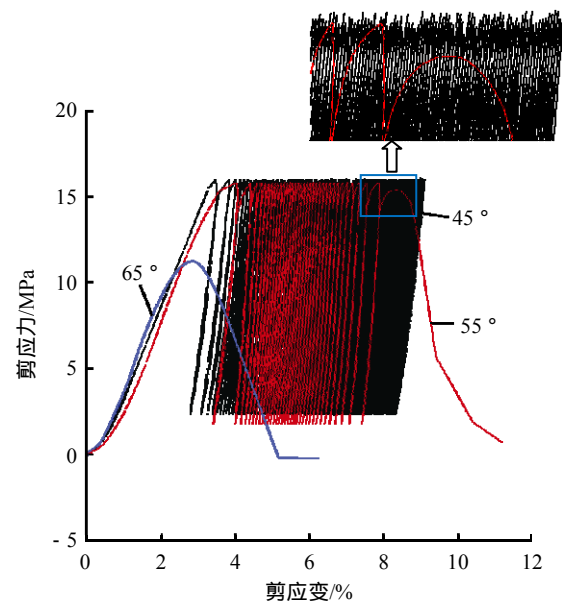


图7 不同剪切角度下盐岩压剪疲劳特性曲线

Fig.7 Characteristic curves of shear fatigue with different shear angles

剪切时,由于时间问题,仅完成了实验的一小部分,已达 100 个循环左右;55 度剪切时,疲劳寿命为 35 个循环;65 度剪切时未达到预期目标值。疲劳寿命和岩石当前环境下的抗压强度相关,应力大小相对于破坏强度越大(即应力水平越大),其疲劳寿命就越短。

3.3 压剪方向对盐岩疲劳特征的影响

在循环荷载作用下,围岩不仅应力大小发生周期性变化,荷载方向也在发生变化。通过反向加载实验发现,反向剪切对盐岩的疲劳损伤特征有以下影响:

(1) 力学特性:经过变向剪切,盐岩试样的疲劳寿命大为降低。图 8 为变向剪切实验的应力-应变曲线,循环数由正向加载的 40 个左右降低为 2~3 个。次循环盐岩的残余变形较正向加载大大增加,同时存在清晰的初始压密段,应变硬化现象几乎不存在。这主要是因为经过正向变形后,晶体内位错停留在障碍密度较高处,一旦反向变形时,位错很容易克服曾经扫过的障碍低密度处,而达到相邻的另一障碍高密度处,即包申格效应。该过程需要的应力和能量都较低,因此,很容易在较小的应力下产生较大的变形。

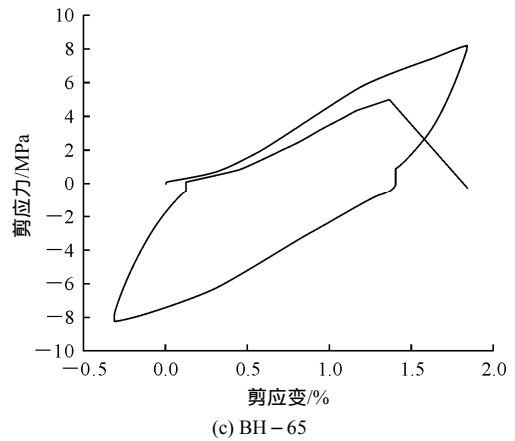
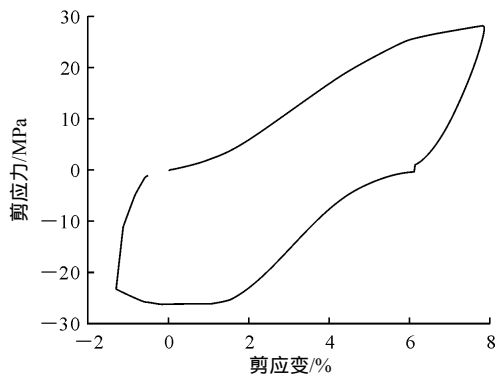


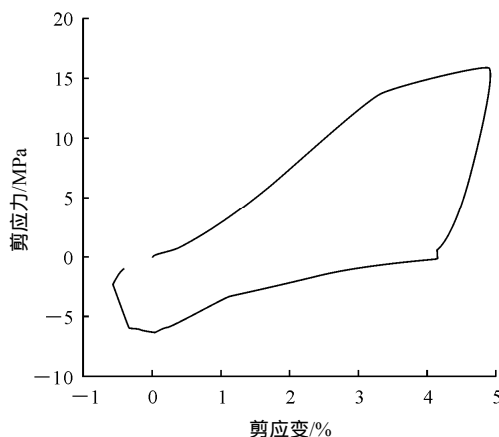
图 8 盐岩变向剪应力-剪应变曲线

Fig.8 Shear stress-shear strain curves of varying shear direction tests

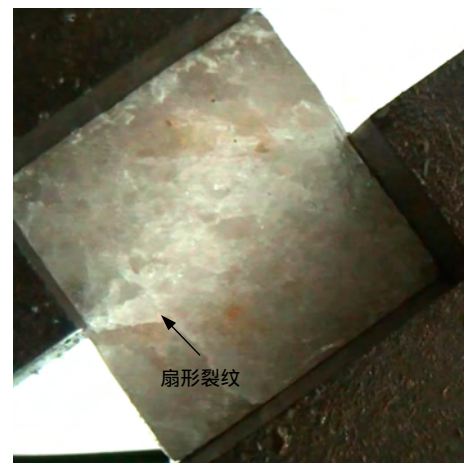
(2) 裂纹特征:反向加载时,位错不可能完全按照原路径返回。位错在反向障碍高密度处大量的堆积,形成新的不同方向的裂纹。原始裂纹将盐岩分割成一个个条带承载体,新裂纹又将条带体再次割裂,新、旧裂纹交织在一起将承载体分割成更破碎的单元,导致盐岩试样滑移面附近的有效承载单元快速减小,失去了承载能力。如图 9 所示,经过反向加载,滑移面附近密集的网状裂纹,已使有效承载单元非常破碎,呈现出大片的白色区域,肉眼已无法辨认裂纹的脉络。



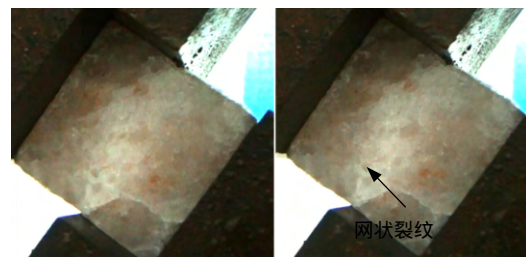
(a) BH-45



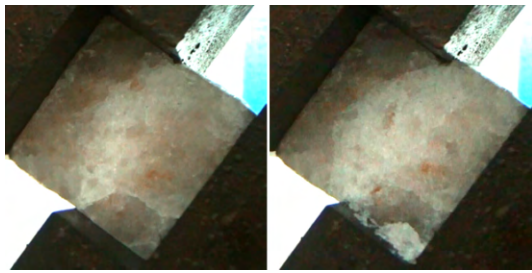
(b) BH-55



(a) 正向剪切



网状裂纹



(b) 反向剪切

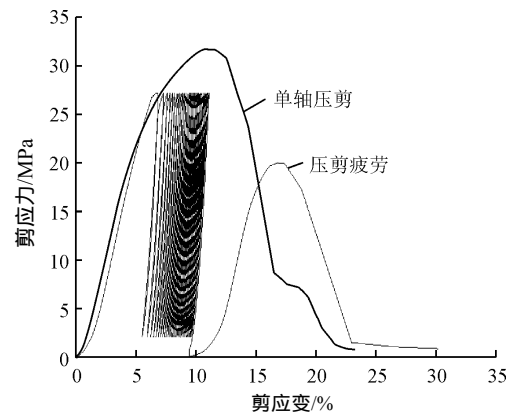
图9 变向剪切破坏过程

Fig.9 Failure process in changing-direction shear tests

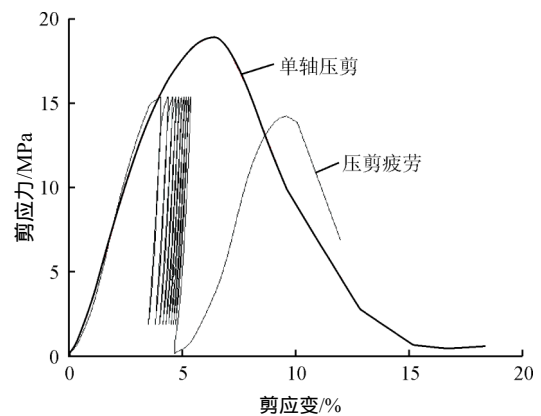
3.4 不同疲劳程度下的盐岩力学特性

经过加载之后的盐岩试样再次加载会存在很明显的应变硬化现象，对弹性模量、泊松比等力学参数的测定和分析不利。将盐岩试样自然放置于干燥的环境中若干天(7 d)，由于无应力环境，盐岩产生的微空隙会重新张开，从而可以有效避免应变硬化现象。但常温放置过程中盐岩存在再结晶、压力致密和扩散 3 种自恢复机制。在本文提供的无应力且干燥的环境中，再结晶、压力致密作用很难发挥效果；扩散作用是一种长期作用，短时间内可以忽略不计。因此，放置过程中自恢复作用可以不考虑。

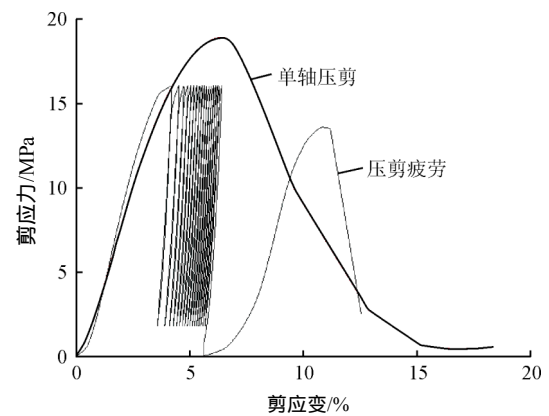
将盐岩试样分别加载至疲劳损伤的减速变形段、匀速变形段和加速变形段，放置一段时间后再次加载的剪应力-剪应变曲线如图 10 所示，可以发



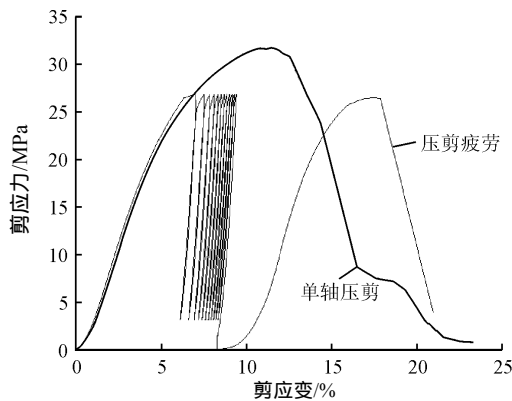
(c) JD-45-3/4



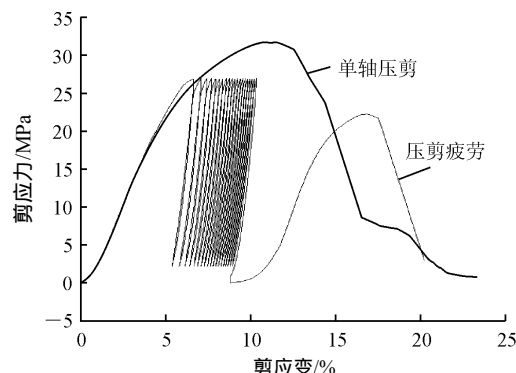
(d) JD-55-1/4



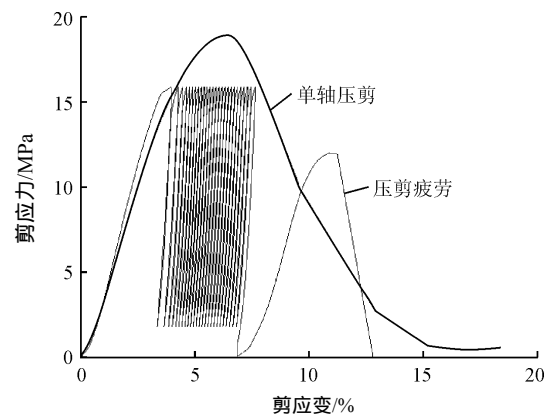
(e) JD-55-2/4



(a) JD-45-1/4



(b) JD-45-2/4



(f) JD-55-3/4

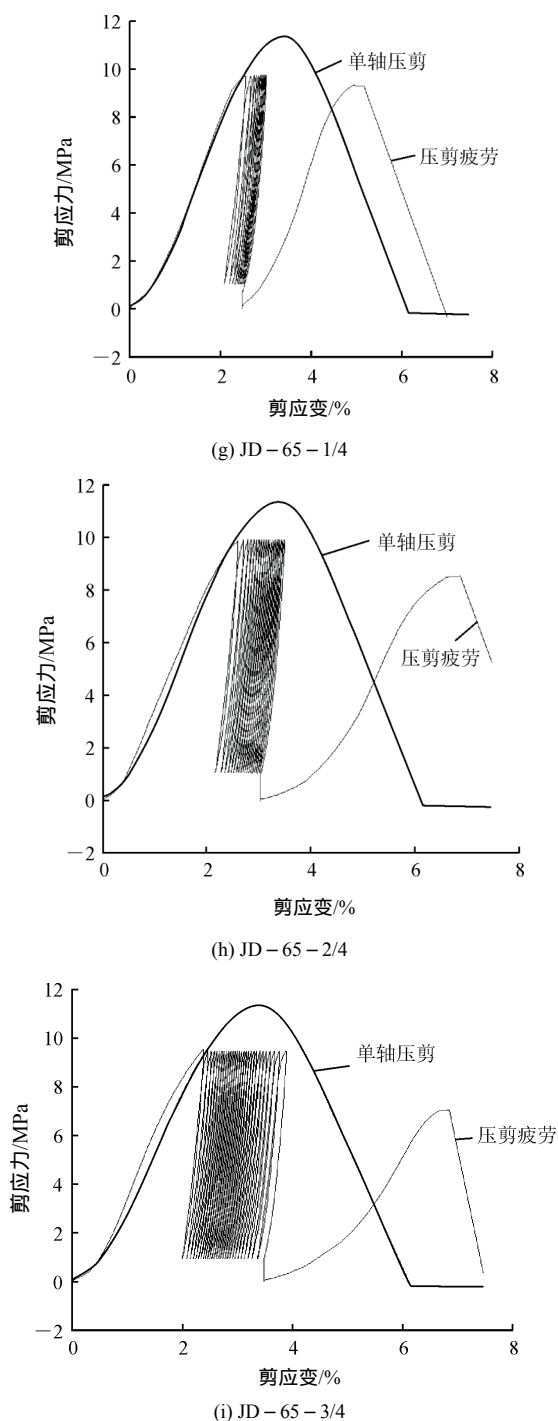


图 10 盐岩疲劳损伤后应力-应变曲线
Fig.10 Stress-strain curves after fatigue damage

现放置后的盐岩试样加载曲线不存在应变硬化现象，且加载曲线已经摆脱了全应力-应变曲线的控制。不同程度的损伤使盐岩的弹性模量和承载能力降低。承载能力的降低随损伤越大以及经历的疲劳循环数越多，下降越明显。

4 基于位错理论的损伤模型

晶体的塑性形变是位错在滑移面上不断滑移的

结果。如果在滑移面上存在某种障碍使位错在障碍物前被迫堆积，就形成位错群的塞积效应。位错群的塞积能产生应力集中，高水平的应力集中可以使晶粒断裂、晶界分离，在宏观上引起裂纹。因此，在一定区域内位错塞积的数量是直接关系晶体损伤的参数，建立以位错为基础的损伤模型，是揭示岩石类晶体损伤的必经步骤。损伤定义采用传统的方法^[24]，即损伤失效面积 A_d 与初始面积 A_0 之比：

$$D = A_d / A_0 \tag{2}$$

若滑移面上的平均位错密度为 C_d ，试样滑移面发生整体割裂时，其平均位错密度为 C_0 ；位错的面积为 A ，则

$$A_d = C_d A \tag{3}$$

$$A_0 = C_0 A \tag{4}$$

于是有

$$D = C_d / C_0 \tag{5}$$

式(5)两边同时乘以滑移面面积，则

$$D = N / N_0 \tag{6}$$

式中： N 为堆积位错数， N_0 为位错总数。

位错生成之后，在应力的作用下向应力集中区域滑移，需要经历一定时间 Δt 才能到达指定区域。滑动中的位错称为运动位错。 n 为位错随时间 t 的生成函数，则有

$$N = \int_0^t n(t) dt - \int_{t-\Delta t}^t n(t) dt \tag{7}$$

应力-应变曲线可以反映一个系统能量变化的过程。盐岩加载过程中总能量由两部分组成：

$$W = \int \sigma_{ij} d\epsilon_{ij} = W_e + W_p \tag{8}$$

式中： W_e 为弹性能， W_p 为塑性能。

岩石力学范围内，物质的弹性行为与其的加载历史无关，只与当前的状态有关。晶体内部位错的产生和滑移构成了岩石变形的塑性能。因此有

$$W_e = W_e(\sigma) \tag{9}$$

$$W_p = \lambda(\Delta t)q + Nm \tag{10}$$

其中，

$$m = W_0 \bar{l} + \delta \bar{d} \tag{11}$$

$$q = \frac{1}{\beta} W_0 \bar{l} + \frac{\delta \bar{d}}{2} \tag{12}$$

式中： \bar{l} 为位错平均长度； W_0 为单位长度静止刃位错的能量^[15]，若是运动位错，则在 W_0 中添加系数 $1/\beta$ ，设位错在介质中传播的速度为 v ，其极限速度以 c 表示，当 v 远小于 c 时， β 取 1； δ 为位错滑移需要克服的派—纳阻力^[15]， \bar{d} 为位错滑移的平均位移。 W_0 和 δ 的计算公式分别为

$$W_0 = \frac{1}{\beta} \frac{\mu b^2}{4\pi(1-\nu)} \left(\ln \frac{r_1}{r_0} - 1 \right) \quad (13)$$

$$\delta = K \frac{2\mu}{1-\nu} \exp \frac{-2\pi a}{(1-\nu)b} \quad (14)$$

式中： μ 为材料的剪切模量； a 为分子点阵间距； b 为滑移面上的原子间距； ν 为材料泊松比； r_1, r_0 分别为位错截面尺寸的外径和内径。

对于压剪实验，改变剪切角度就改变了滑移面法线上的正应力。正应力的存在增大了位错的滑滞阻力，对滑滞阻力 δ 添加修正系数 K ， K 的大小为

$$K = 1 + \sigma_3 / \sigma_t \quad (15)$$

式中： σ_3 为滑移面上的法线方向应力， σ_t 为材料的抗拉强度。

生成的未滑移到指定位置的位错数可以记为 $n(\Delta t)$ 。通过式(8)~(13)进行代换得到堆积的位错数及最终位错总数：

$$N = \frac{W - W_e}{m} - n_t(\Delta t) \frac{q}{m} \quad (16)$$

$$N_0 = \frac{W_f - W_e}{m} - n_f(\Delta t) \frac{q}{m} \quad (17)$$

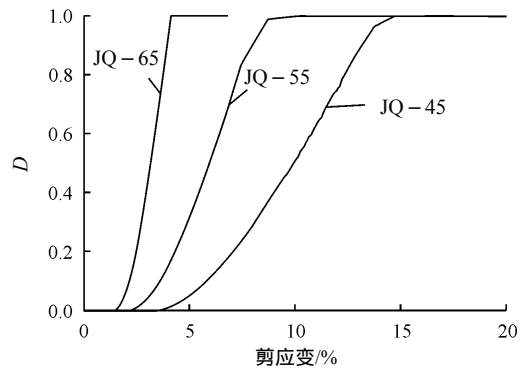
式中： W_f 为加载全过程的应变能， $n_t(\Delta t)$ 为 t 时刻的位错数， $n_f(\Delta t)$ 为全过程产生的位错数。综合式(2)，(16)，(17)，可得

$$D = \frac{W - W_e - n_t(\Delta t)q}{W_f - W_e - n_f(\Delta t)q} \quad (18)$$

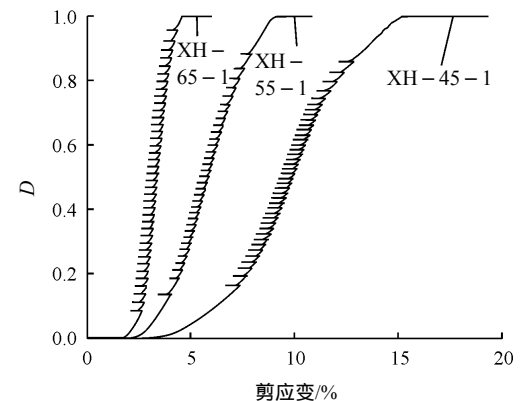
本文中的压剪实验中， Δt 相对于实验时间是非常小的基本可以忽略。于是式(18)可以合理简化为

$$D = \frac{W - W_e}{W_f - W_e} \quad (19)$$

根据式(19)，计算不同剪切角度下的盐岩压剪实验和疲劳实验的损伤，如图 11 所示。不同角度实验的损伤演化都随着变形逐渐增大，并最终破坏。疲劳实验中，每个循环的卸载过程是外力系统有序的收缩过程，不对试样施加主动约束，对材料造成的新增损伤应当基本为 0，模型中很好地体现了这一点。



(a) 压剪实验



(b) 疲劳实验

图 11 盐岩的损伤曲线

Fig.11 Damage curves of salt rock

5 讨论

(1) 实验结果存在“异常规律”。观察图 10 发现，随着循环数的增加，损伤试样的峰值强度呈现降低趋势，但均低于循环荷载的历史上限值，统计结果如表 4 所示。

表 4 损伤后峰值强度

Table 4 Peak strengths after damage

剪切角度/(°)	峰值强度/MPa			
	应力上限	1/4 实验	2/4 实验	3/4 实验
45	40.5	39.5	32.9	28.4
55	19.5	17.4	16.8	15.4
65	10.5	10.2	9.3	8.7

依据实验方案，试样在未完全损伤前，每一周期加载阶段均应达到历史应力上限。盐岩损伤后峰值强度“异常”的可能原因是：由于盐岩是一种软岩，外力撤离后，内应力来不及释放。位错在随后内应力缓慢释放的作用下呈反向运动，相当于反向加载，造成了盐岩的二次损伤，从而导致了损伤后峰值强度均低于上限应力的现象。

(2) 根据姜德义等^[25-28]的研究成果, 盐岩应变率越大, 相同应变所对应的应力幅值也越大; 周期荷载作用下, 加载速率的增大能够使盐岩的疲劳寿命增加。这些均说明了速率的增大能够使盐岩的损伤减小, 根据位错理论可知其原因为位错通过塑性应变在宏观上表现出来, 位错可以记为和塑性变形 ε_p 直接关联的函数:

$$n(t) = f(\varepsilon_p) \quad (20)$$

若实验采用匀速位移加载, 则单位时间的变形是一个常数。那么运动位错数是单位时间内的位错数与时间间隔的乘积。NaCl 晶体的位错的速率应力敏感系数比较大(为 14.5 左右), 即当实验的匀速位移加载速率增大时, 单位时间位错数增大的程度比时间间隔减小的程度大。因此移动位错数随加载速率的增加而减小, 根据式(17)可知, 若 $n(\Delta t)$ 增大, 则损伤减小, 但是由于 $n(\Delta t)q$ 的相对量较小, 加载速率小范围内的增加或减小对的损伤影响程度是微弱的。在单轴实验和三轴实验中, 加载速率提高了盐岩的强度, 使部分区域承受更大的应力。在较大速率时, 盐岩内部晶粒的应力来不及向四周传递, 使高应力区的位错更集中、快速的发展, 因此造成了盐岩的裂纹更多、更散。上述讨论说明, 基于位错理论建立的损失模型更能从本质上揭示和预测损伤的演化规律。

6 结 论

本文基于位错理论, 研究了盐岩的压剪特性、疲劳特性、变向疲劳特性和阶段疲劳损伤特性。并建立了盐岩的位错损伤模型。主要结论有:

(1) 盐岩的压剪特性曲线具有阶段性特征。随着剪切角的增大, 滑移面上的正应力变小, 位错的滑滞阻力变小, 导致盐岩试样的峰值强度、弹性极限、最大变形均减小。压剪角度越大, 盐岩的扇形裂纹区域越小, 主裂纹的优势发展趋势越明显。

(2) 剪切角度不同时, 应力水平的大小决定着盐岩的疲劳寿命。疲劳裂纹相比压剪裂纹更加集中, 优势带更加明显。

(3) 变向剪切使盐岩试样的疲劳寿命大幅降低。包申格效应和网状裂纹是造成这一现象的主要原因。

(4) 基于位错理论, 建立的损伤演化模型能够更本质地反映盐岩的损伤演化规律。

参考文献(References):

- [1] 刘建锋, 徐进, 杨春和, 等. 盐岩拉伸破坏力学特性的实验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(4): 580-586. (LIU Jianfeng, XU Jin, YANG Chunhe, et al. Mechanical characteristics of tensile failure of salt rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(4): 580-586. (in Chinese))
- [2] 郭印同, 杨春和, 付建军. 盐岩三轴卸荷力学特性实验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(3): 725-730. (GUO Yintong, YANG Chunhe, FU Jianjun. Experimental research on mechanical characteristics of salt rock under triaxial unloading test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(3): 725-730. (in Chinese))
- [3] THOMS R L, GEHLE R M. A brief history of salt cavern use[C]// Proceedings of the 8th World Salt Symposium. [S.L.]: Elsevier, 2000: 207-214.
- [4] 任松, 白月明, 姜德义, 等. 周期荷载作用下盐岩声发射特征实验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(6): 1613-1618. (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. (in Chinese))
- [5] YANG C H, LI Y P. Cosserat medium constitutive model for laminated salt rock numerical analysis of cavern stability in deep bedded salt rock formations[C]// Proceeding of the 41st U.S. Rock Mechanics Symposium and the 50th Anniversary. [S. L.]: Curran Associates, Inc., 2006: 915-921.
- [6] 任松, 白月明, 姜德义, 等. 温度对盐岩疲劳特性影响的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(9): 1839-1845. (REN Song, BAI Yueming, JIANG Deyi, et al. Experimental study of temperature effect on fatigue property of salt rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(9): 1839-1845. (in Chinese))
- [7] HAKAN A. Percolation model for dilatancy-induced permeability of the excavation damaged zone in rock salt[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 46(4): 716-724.
- [8] 徐速超, 冯夏庭, 陈炳瑞. 矽卡岩单轴循环加卸载实验及声发射特性研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 2929-2934. (XU Suchao, FENG Xiating, CHEN Bingrui. Experimental study of skarn under uniaxial cyclic loading and unloading test and acoustic emission characteristics[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(10): 2929-2934. (in Chinese))
- [9] DING J, HALL R, BYRNE J. Effects of stress ratio and temperature on fatigue crack growth in a Ti-6Al-4V alloy[J]. International Journal of Fatigue, 2005, 27(10/11/12): 1551-1558.
- [10] BAGDE M N, PETROS V. Fatigue properties of intact sandstone samples subjected to dynamic uniaxial cyclical loading[J]. International

- Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2005, 42(2): 237–250.
- [11] 姜德义, 范金洋, 陈 结, 等. 围压卸载速率对盐岩扩容损伤影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增2): 3154–3159. (JIANG Deyi, FAN Jinyang, CHEN Jie, et al. Research on capacity expansion damage of the salt under the different rate of confining pressure unloading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(Supp.2): 3154–3159. (in Chinese))
- [12] Al-SHAYEA, N A. Effects of testing methods and conditions on the elastic properties of limestone rock[J]. Engineering Geology, 2004, 74(1/2): 139–156.
- [13] 李建兵, 李建华, 张超新, 等. 用位错胞及正电子湮没寿命为参量的损伤演变律[J]. 华中科技大学学报: 城市科学版, 2006, 23(增2): 71–73. (LI Jianbing, LI Jianhua, ZHANG Chaoxin, et al. Damage evolution law study by micro-parameter of dislocation cell and positron annihilation life[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Urban Science, 2006, 23(Supp.2): 71–73. (in Chinese))
- [14] 钱才富. 位错和位错偶沿单一滑移系从裂纹尖端的发射[J]. 金属学报, 1999, (5): 546–550. (QIAN Caifu. Dislocation and dislocation along a single slip system from crack tip emission[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1999, (5): 546–550. (in Chinese))
- [15] 赵敬世. 位错理论基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 1989: 45–89. (ZHAO Jingshi. The base of dislocation theory[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1989: 45–89 (in Chinese))
- [16] 庄 茁, 崔一男, 高 原, 等. 亚微米尺度晶体反常规苏醒行为的离散位错研究进展[J]. 力学进展, 2011, 41(6): 647–667. (ZHUANG Zhuo, CUI Yinan, GAO Yuan, et al. Progress discrete dislocation sub-micron scale crystals wake unconventional behavior[J]. Advances in Mechanics, 2011, 41(6): 647–667. (in Chinese))
- [17] 杜正兴, 温志勋, 侯乃先, 等. 考虑两种晶界的各向异性双晶和三晶体晶界附近弹塑性应力场分析[J]. 计算力学学报, 2008, 25(5): 627–633. (DU Zhengxing, WEN Zhixun, HOU Naixian, et al. Consider two double-crystal grain boundaries and anisotropic elastic-plastic stress field in the vicinity of three crystal grain boundary analysis[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2008, 25(5): 627–633. (in Chinese))
- [18] 高英俊, 卢成健, 黄礼琳, 等. 晶界位错运动与位错反应过程的晶体相场模拟[J]. 金属学报, 2014, 50(1): 110–120. (GAO Yingjun, LU Chengjian, HUANG Lilin, et al. Phase field crystal simulation of dislocation movement and reaction[J]. 2014, 50(1): 110–120. (in Chinese))
- [19] 李东升, 杨德仁, 朱爱平, 等. 氮杂质对直拉单晶硅中位错的作用[J]. 半导体学报, 2001, 22(11): 1401–1405. (LI Dongsheng, YANG Deren, ZHU Aiping, et al. Nitrogen in Czochralski silicon impurities on the role of dislocations[J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2001, 22(11): 1401–1405. (in Chinese))
- [20] 钱才富, 李慧芳, 崔文勇. I型裂纹尖端塑性区和无位错区及其对裂纹扩展的影响[J]. 材料研究学报, 2007, 21(6): 599–603. (QIAN Caifu, LI Huifang, CUI Wenyong. Mode I crack tip plastic zone, dislocation-free zone and their effects on crack propagation[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2007, 21(6): 599–603. (in Chinese))
- [21] KILIAN R, HEILBRONNER R, STÜNITZ H. Quartz grain size reduction in a granitoid rock and the transition from dislocation to diffusion creep [J]. Journal of Structural Geology, 2011, 33(8): 1265–1284.
- [22] FLIERVOET T F, DRURY M R, CHOPRA P N. Crystallographic preferred orientations and misorientations in some olivine rocks deformed by diffusion or dislocation creep[J]. Tectonophysics, 1999, 303, (1/4): 1–27.
- [23] BYSTRICKY M, HEIDELBACH F, MACKWELL S. Large-strain deformation and strain partitioning in polyphase rocks: dislocation creep of olivine-magnesiowüstite aggregates[J]. Tectonophysics, 2006, 427(1/4): 115–132.
- [24] 王 军. 损伤力学的理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 18–25. (WANG Jun. The theory and applied of damage mechanism[M]. Beijing: Science Press, 1997: 18–25. (in Chinese))
- [25] 姜德义, 陈 结, 任 松, 等. 盐岩单轴应变率效应与声发射特征实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(1): 1–11. (JIANG Deyi, CHEN Jie, REN Song, et al. Experimental study of strain rate effect and acoustic Emission characteristics of salt rock under uniaxial Compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(1): 1–11. (in Chinese))
- [26] 纪文栋, 杨春和, 姚院峰, 等. 应变加载速率对盐岩力学性能的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(12): 2507–2513. (JI Wendong, YANG Chunhe, YAO Yuanfeng, et al. Effects of loading strain rate on mechanical performances of salt rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(12): 2507–2513. (in Chinese))
- [27] 姜德义, 范金洋, 陈 结, 等. 应力因素下的盐岩卸荷扩容实验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(增 1): 41–46. (JIANG Deyi, FAN Jinyang, CHEN Jie, et al. Test study of unloading capacity expansion characteristics of salt rock under stress factors[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(Supp.1): 41–46. (in Chinese))
- [28] 万志军, 李学华, 刘长友, 等. 加载速率对岩石声发射活动的影响[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2001, 20(4): 469–471. (WAN Zhijun, LI Xuehua, LIU Changyou, et al. Influence of loading velocity on the rock's acoustic emission activity[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2001, 20(4): 469–471. (in Chinese))