

不同波形的循环荷载下盐岩力学特性研究

刘力焯

中铁第四勘察设计院集团有限公司

摘要: 研究目的: 岩盐具有良好的流变性、低渗透性和损伤自恢复等特性, 地下盐穴被广泛用于储存天然气和压缩空气。在盐穴储气库运行过程中, 盐穴围岩在恒定压力阶段产生蠕变变形, 在注采气阶段产生疲劳变形。因此, 盐岩承受复杂路径的疲劳荷载, 对其力学特性的研究尤为重要。本文主要研究加载波形对盐岩疲劳特性的影响, 采用不同形式的梯形波模拟复杂的疲劳荷载, 其中包括不同应力幅和不同的保载时间。研究结论: 疲劳试验下盐岩轴向应变的发展分为三个阶段: 初始阶段、稳定阶段和加速阶段。与连续疲劳试验相比, 梯形波中保载阶段的出现会产生较大的塑性变形并降低了疲劳寿命, 而对弹性变形影响不大。

关键词: 盐岩; 加载波形; 疲劳; 保载时间; 压气蓄能

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2023.13.116

一、引言

由于良好的流变性^[1]、低渗透性^[2]以及损坏自修复^[3], 盐岩是能源地下储存和放射性废料地质储存的首选介质。作为能源转换和利用的一种方式, 压缩空气储能的特点是存储容量大、污染低、可靠性高^[4]。在压缩空气储能电站运行过程中, 地下盐穴用于储存和释放压缩空气。盐穴内部气压在一个运行周期内分为四个阶段: 注气、恒定高压、采气、恒定低压。盐穴内部气体压力的周期性变化会对围岩产生损伤, 在一个运行周期内, 盐岩会经历不连续的疲劳或变应力的蠕变, 传统关于盐岩的蠕变和疲劳特性的研究不适用于此^[5]。

因此, 需要对岩盐进行不同波形下的疲劳试验。许多学者进行了不同材料的疲劳试验, 并研究了其在应变控制条件下的蠕变疲劳行为。根据高温(650℃)下GH4169超合金的疲劳和蠕变疲劳试验, Wei和Yang^[6]定量分析了保载时间对两种镍超级合金的蠕变疲劳寿命的影响。在拉伸条件下, 应变幅越大减少更多的寿命, 而在纯压缩条件下应变幅对疲劳寿命的影响不大。三个加载变量(应变幅 $\Delta \epsilon$ 、在最大循环应力处的保载时间 t_H 和在最小循环应力处的保载时间 t_L)可用于研究保载时间对蠕变疲劳性能的影响^[7]。在岩石力学和工程领域, 其他研究人员在岩盐中结合声发射监测进行了不连续的疲劳试验, 并分析了破坏机制和疲劳特性。但是这种不连续疲劳试验的特点是增加无应力的间隔。因此, 对有不同加载波形下岩盐的疲劳特性尚不清楚。在本研究中, 通过实验分析了加载波形对盐岩疲劳特性的影响, 选择最大应力的保载时间和最低应力时的保载时间的不同组合来研究加载波形的影响。

二、试验样品和试验条件

本次试验使用的设备是岩石高温高压蠕变仪, 它由轴向压力系统、横向压力系统、孔隙水系统、加热系统

和微机控制系统组成^[8]。盐岩样品来自巴基斯坦Khwera盐矿, 具有很高的纯度其NaCl含量超过96%。为了防止盐岩吸水, 样品通过线切割加工成一个圆柱体(直径50毫米, 长度100毫米)。轴向应变由传感器测量, 其在试验中监测活塞的位置。横向应变由链条固定在样品表面的伸长计测量。

(一) 单轴压缩试验

在疲劳试验中, 上限和下限应力由岩盐单轴压缩强度的百分比定义。因此, 我们首先在恒定应变速率($2.5 \times 10^{-5} s^{-1}$)下进行了单轴压缩测试。试验过程的最大应力称为单轴压缩强度。考虑到岩土材料的强度偏差, 进行了三次重复实验。岩盐的单轴压缩强度范围从22.60MPa到23.70MPa, 平均值为23.18MPa。

(二) 不同波形下的疲劳试验

疲劳实验采用1.4kN/s加载速度的应力控制, 其加载路径分为四种类型(图1)。波形(a)用于定义为0-0。在最小应力下加保载时间的波形(b)定义为0- t_L 。在最大应力下具有保载时间的波形(c)定义为 t_H -0。在最大和最小应力下均具有保载时间的波形(d)定义为 t_H - t_L 。这些样品在单轴压缩条件下进行试验(表1)。

表1 不同波形的疲劳试验中样品信息
(最大循环应力: 80%单轴压缩强度)

样品编号	最小循环应力 (单轴压缩强度的百分比)	t_L (s)	t_H (s)
F-1	10	0	0
F-2	20	0	0
F-3	30	0	0
CF-1	10	0	90
CF-2	10	90	0
CF-3	10	90	90
CF-4	20	0	90
CF-5	20	90	0
CF-6	20	90	90
CF-7	30	0	60
CF-8	30	60	0
CF-9	30	60	60
CF-10	30	0	90
CF-11	30	90	0
CF-12	30	90	90
CF-13	30	0	120
CF-14	30	120	0
CF-15	30	120	120

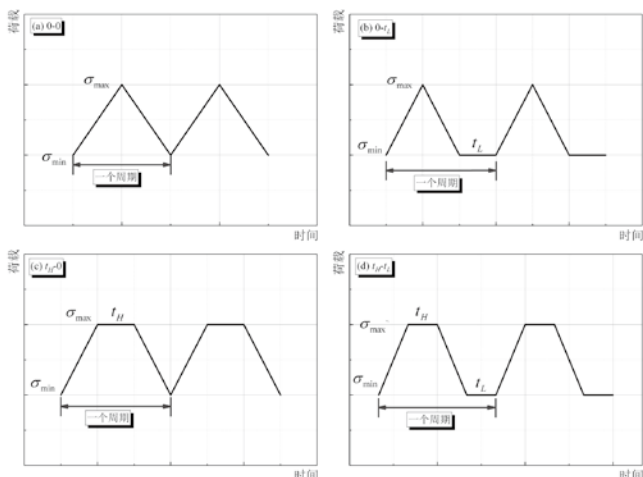


图1 不同加载波形示意图 (a) 0-0, (b) 0-t_L, (c) t_H-0, (d) t_H-t_L.

三、结果

(一) 力学特性

不同加载波形下应变-时间曲线如图 2 所示。与典型的蠕变曲线类似^[9], 盐岩在四种波形下的轴向应变发展可分为三个阶段: 初始阶段、稳定阶段和加速阶段。在初始变形阶段, 轴向应变发展迅速。到稳定阶段时, 变形逐渐发展, 这个阶段占了整个加载过程的大部分时间。在加速阶段, 应变率迅速增加, 直到样品破坏。对于稳定的蠕变速率, 四种波形有不同的值, 可分为两组: (0-0, 0-t_L) 和 (t_H-0, t_H-t_L)。当保载时间处于最大循环应力时, 蠕变率大于保载时间在最小循环应力处的蠕变率, 稳定阶段蠕变率与应力水平呈正相关^[10]。

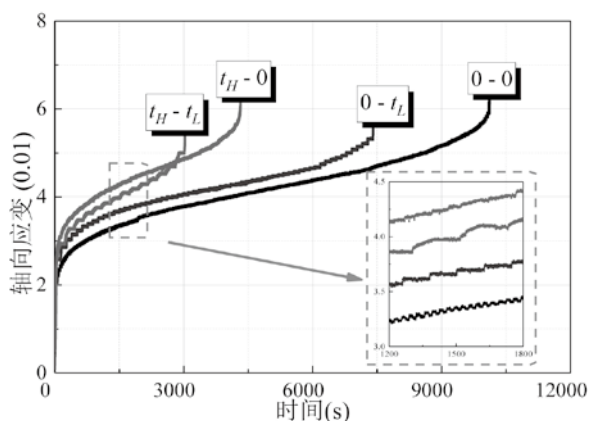


图2 不同加载波形下的轴向应变-时间曲线

(二) 加载波形对疲劳寿命的影响

图3为不同加载波形下盐岩的疲劳寿命。这些样品具有相同的保载时间, 而其应力幅从11.03MPa变化到15.4MPa (图3a)。在同一加载波形和保载时间下, 随着应力幅的增加, 岩盐的蠕变疲劳寿命减少。对于相同的应力幅 (以 $\Delta\sigma$ 表示), 低周疲劳试验的寿命最长, 其次是0-t_L波形和 t_H-0波形。t_H-t_L波形的疲劳试验的寿命最低。图3b表示了在不同保载时间下的疲劳寿命, 这些样品的应力幅为 11.03 MPa。在相同的应力幅

和加载波形下, 蠕变疲劳寿命随着保载时间的增加而缩短。

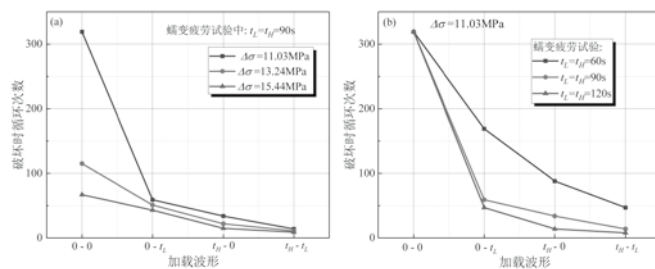


图3 不同加载波形下盐岩的疲劳寿命。上限循环应力为单轴压缩强度的80%, (a) 相同保载时间下, 应力幅为50%, 60%, 70% 单轴压缩强度 (b) 相同应力幅下保载时间为60s, 90s, 120s。

(三) 加载波形对疲劳变形的影响

为了研究保载时间在最大循环应力 (高压力保载) 或最小循环应力 (低压力保载) 或两处同时保载的影响, 计算了每个周期中保载阶段产生的应变。图 4为在 t_H-t_L波形中每个周期高应力保载和低应力保载中的应变, 高应力保载阶段产生的变形明显大于低应力保载阶段。

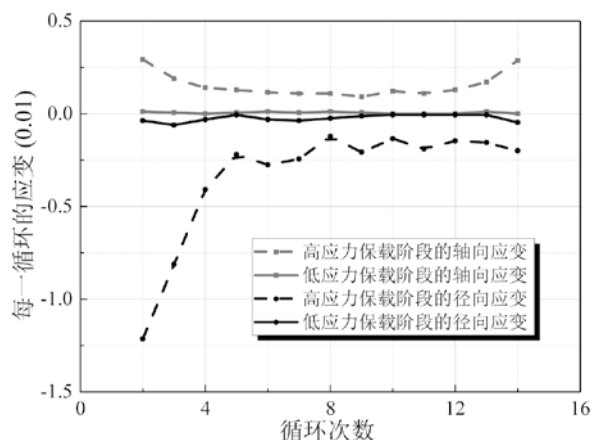


图4 加载波形t_H-t_L中在低应力保载和高应力保载阶段每个循环的轴向和径向应变。(最大和最小循环应力分别为单轴压缩强度的80%和30%, 低应力和高应力处的保载时间均为90s)。

每个周期的总变形被分解成弹性和塑性部分。图5为不同加载波形中每个周期的弹性应变和塑性应变。t_H-t_L波形的疲劳试验中每个周期的塑性变形最大, 其次是t_H-0和0-t_L波形的疲劳测试。低周疲劳试验中的每个周期的塑性变形最低。在疲劳试验中, 每个周期的弹性轴向应变范围从0.02到0.04。这些结果表明, 与连续疲劳试验相比, 保载时间促进了塑性变形, 但对弹性变形影响不大。

四、结论

本文进行了不同波形下的盐岩疲劳试验, 以研究加载波形对盐岩力学特性的影响。可以得出几个结论:

(1) 不同加载波形下的疲劳试验中, 轴向应变具有类似的发展趋势, 可分为三个阶段: 初始阶段、稳定

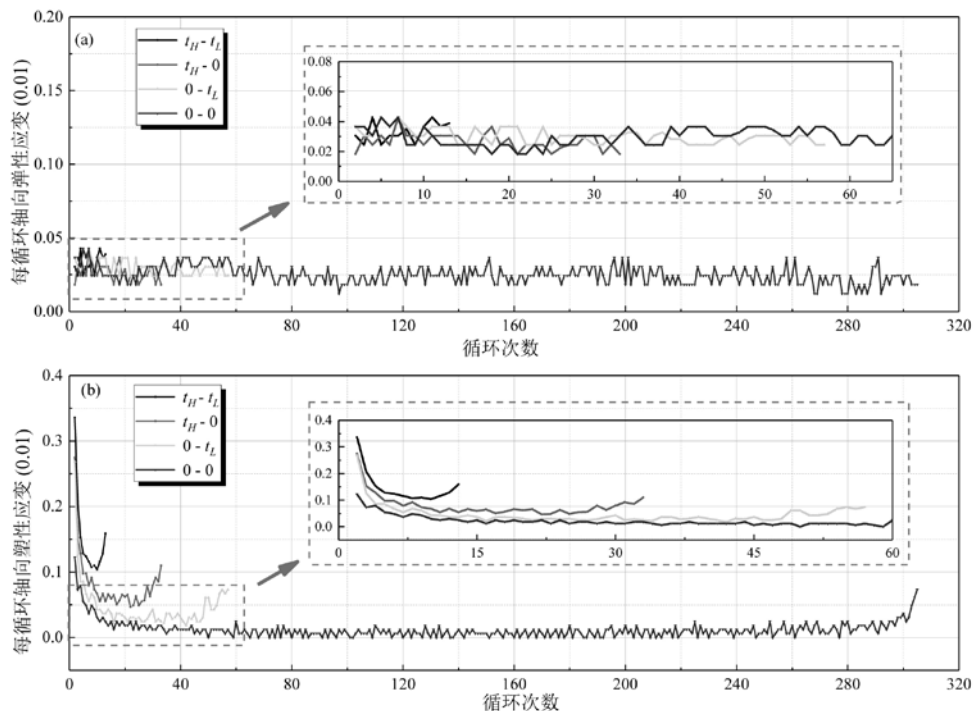


图5 不同加载波形下每一循环的弹性应变 (a) 和塑性应变 (b) (最大和最小循环应力分别为单轴压缩强度的80%和30%, 低应力和高应力处的保载时间均为90s)

阶段和加速阶段;

(2) 与连续疲劳试验相比, 每个周期之间保载时间降低了疲劳寿命, 并产生更大的变形。保载位置在最大和最小循环压力处的影响最大, 其次是保载时间仅在最大循环应力和最小循环应力处;

(3) 与保载时间在最小循环应力处相比, 保载时间在最大循环应力处的波形具有较高的稳定蠕变速率, 而二者的弹性变形几乎没有区别。

参考文献

[1] LIU Jiang, et al., Study on creep characteristics and constitutive relation of rock salt[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006. 27(8): p. 1267-1271.

[2] YU Bao-ping, et al., Investigation on rheodestruction and permeability of surrounding rock for long-term running storage cavern in bedded rock salt[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008. 29(S1): p. 241-246.

[3] JIANG De-yi, et al., Experimental research on properties of short-term self recovery of damaged salt rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015. 37(4): p. 594-600.

[4] XU Xin-jiao, YANG Chun-he, and LI Yin-ping, Review on compressed air energy storage abroad and its feasibility application to Hubei province[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006. 25(2): p. 3987-3992.

[5] WANG Ya-song, et al., Development in

research on creep and fatigue damage of rock[J]. Industrial Construction, 2016. 46(4): p. 120-127+168.

[6] Wei, D.-S. and X.-G. Yang, Investigation and modeling of low cycle fatigue behaviors of two Ni-based superalloys under dwell conditions[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2009. 86(9): p. 616-621.

[7] Brinkman, C. and G. Korth, Strain Fatigue and Tensile Behavior of Inconel® 718 from Room Temperature to 650 C[J]. Journal of testing and evaluation, 1974. 2(4): p. 249-259.

[8] Li, L., et al., Development of compound EPB shield model test system for studying the water inrushes in karst regions. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020. 101.

[9] WANG Jun-bao, et al., Creep properties of salt rock and its nonlinear constitutive model[J]. Journal of China coal society, 2014. 39(3): p. 445-451.

[10] DU Chao, et al., Study of creep characteristics of deep rock salt[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012(08): p. 2451-2456+2520.

作者简介: 刘力焯 (1990—), 男, 工程师, 2013年毕业于河海大学交通工程专业, 工学学士, 2015年毕业于河海大学建筑与土木工程专业, 工程硕士, 主要从事工程建设及岩土工程研究工作。

基金项目: 中铁第四勘察设计院集团有限公司科技研发项目 (2018K022, 2020K037)