

灰岩三轴循环力学特性及能量演化特征试验研究

陈传平

(中铁二十局集团 第四工程有限公司, 山东 青岛 266000)

摘要:岩石的三轴力学特性及变形破坏特征对于指导地下工程稳定具有重要的意义。针对徐州地铁地层中灰岩开展了常规三轴和三轴循环加卸载试验,基于围压变化,分析其应力应变曲线、强度特征、破坏模式和能量演化特征,确定了灰岩力学特性及能量演化特征。具体结论如下,围压的升高会造成灰岩的弹性模量、变形模量、峰值强度和损伤阈值均逐渐增大,破坏模式由拉伸破坏转变为剪切破坏;三轴循环加卸载下灰岩的材料属性劣化程度要低于常规三轴,裂纹的贯通网络要比常规三轴的更为复杂;循环加卸载过程中能量演化呈现不同趋势,可依据单个循环内弹性能快速降低和耗散能快速升高作为岩石破坏的前兆信息。研究结果可为徐州地铁隧道和硐室的开挖及支护提供一定的指导。

关键词:灰岩;三轴力学;变形破坏特征;围压效应;循环载荷

中图分类号:O319.56 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2022)02-0067-07

在地下工程中,隧道及硐室的开挖使得围岩处于复杂的三轴应力环境中。同时,由于天然岩石内部随机分布多个孔隙、裂隙及结构面,在外部载荷作用下通常会表现出各向异性、不连续性和非均质性的特征^[1]。因此,为了维护地下工程稳定,指导隧道和硐室的开挖及支护,必须开展岩石在不同应力路径下的力学特性及变形破坏研究。

徐州地铁 1 号至 4 号线贯穿徐州城区东西,连接南北,是徐州重要的民生工程。在地下隧道开挖的过程中,隧道上覆岩层主要是灰岩。徐州地铁附近灰岩,属于中等风化灰岩层,岩体完整性指数 0.74,内部裂隙发育,方解石充填。对于灰岩的力学特性及变形破坏研究主要集中在以下方面,李兵磊等^[2]研究了冲击载荷下灰岩的动力学特性及能量耗散规律,发现灰岩耗散能随冲击速度和冲击次数的增加而增加。胡芳江^[3]开展了水库地区裂隙灰岩水-力耦合作用下力学特性试验,确定了渗透规律。马涛等^[4]研究了酸性水化学溶液侵蚀下不同矿物成分含量灰岩溶解特性及力学特性,发现灰岩力学损伤规律与其溶解动力学行为之间呈现良好的相关性。张牧子等^[5]进行了单轴压缩条件下溶蚀礁灰岩细观变形破坏特征研究,构建了随机溶蚀孔洞的离散元模型,模拟孔洞型溶蚀礁灰岩的细观变形破坏特征,分析其变形破坏规律与裂隙演化特征。余兴建等^[6]开展了高温作用后灰岩物理力学性质变化试验研究,发现 350 °C 是灰岩泊松比发生突变的转折点。郑建国等^[7]分析了珊瑚礁灰岩的透水特性,提出了针对珊瑚礁灰岩地区基坑的止水降水措施。熊良宵等^[8]研究了单节理裂隙岩体的力学特性,发现了节理岩体的力学特性受节理影响较大。满令聪等^[9]采用人工地震波进行超前地质探测,为徐州地铁灰岩地层溶洞探测提供了方法。

上述研究对于灰岩的渗透性、溶解性、单轴力学特性及变形破坏特性做出了深入的研究,然而工程中的灰岩常处于三轴应力条件下,需要考虑围压效应。由于徐州地铁 4 号线南三环站基坑开挖深度大(31.5 m),基坑距离已通车的高架桥 1.5 m,且有一处暗挖隧道下穿高架桥,因此,针对徐州地铁南三环站的灰岩时常处于循环载荷的扰动下,拟开展考虑围压效应的灰岩三轴力学特性、变形破坏及能量演化特征研究,这对于徐州地铁隧道和硐室的开挖支护、深基坑的支护结构、施工设备的选型及施工工艺具有重要的意义。

收稿日期:2022-02-13 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.20220016

作者简介:陈传平(1986—),男,工程师,研究方向为隧道及地下工程施工与管理。E-mail:464841258@qq.com

陈传平.灰岩三轴循环力学特性及能量演化特征试验研究[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2022,35(2):67-73.

1 试验概况

1.1 现场取样和岩样加工

图 1(a)所示试验样品取自徐州地铁 4 号线南三环车站地层中的灰岩,钻孔岩芯呈长-短柱状,局部碎块,裂隙发育,方解石充填,平均厚度为 9.36 m。经实验室测定,灰岩 RQD 值 47%~100%,属于较硬岩石。图 1(b)为加工后的样品,采用湿式加工法,加工成直径 50 mm 和高度 100 mm 的圆柱形试样,自然风干后选择表面完整的试样用于试验测试。通过 X 衍射(XRD)分析可知,该灰岩试样的矿物成分为 52.45%方解石、43.58%白云石、3.97%石英,如图 2 所示。压汞实验确定试样孔隙率为 3.61%。



图 1 试验样品

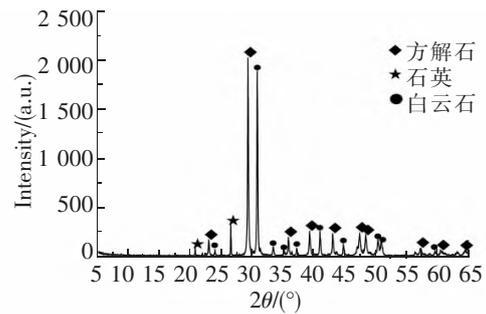


图 2 灰岩矿物成分

1.2 试验系统及方案

试验设备采用 GCTS RTX-4000 岩石高温高压三轴测试系统,最大轴向加载力为 4 000 kN,最大围压为 140 MPa。加载系统采用独立的伺服控制,能自动调零、自动标定、连续全程测量不分档,可进行试验力、变形、位移等速率控制及恒试验力、恒应变形、恒位移控制,可自动测量轴向、径向变形,自动求出弹性模量及泊松比。

试验方案采用三轴循环加卸载和常规三轴位移加载。常规三轴采用轴向位移加载,加载速率为 0.04 mm/min,围压加载速率为 4 MPa/min,围压梯度设置为 0、5、10、20 MPa,位移加载直至岩石破坏。三轴循环加卸载轴向加载速率为 0.04 mm/min,卸载速率为 40 MPa/min,围压加载速率为 4 MPa/min,围压梯度设置为 0、5、10、20 MPa。循环加卸载每次循环的应变上限设置是以相同围压下的常规三轴峰值应变决定,初次加载至相同围压下常规三轴峰值应变的 50%,然后卸载至 1 MPa,之后每次循环的应变上限增加 10%,直至岩石破坏。表 1 为灰岩试样的物理参数。

表 1 灰岩物理力学参数

加载方式	岩样编号	围压/MPa	直径/mm	高度/mm	密度/(g·cm ⁻³)
常规三轴	LJ-D-1	0	50.24	99.47	2.687
	LJ-D-2	5	50.14	99.32	2.707
	LJ-D-3	10	50.13	99.72	2.730
	LJ-D-4	20	50.17	99.92	2.691
三轴循环加卸载	LJ-E-1	0	50.15	99.49	2.714
	LJ-E-2	5	50.15	99.62	2.713
	LJ-E-3	10	50.14	99.12	2.726
	LJ-E-4	20	50.14	99.48	2.709

2 试验概况

2.1 应力应变曲线

图 3 为相同围压下,常规三轴与三轴循环加卸载应力应变曲线。从图 3 可以看出,围压较低时,试样压密阶段明显,而随着围压的升高压密阶段不明显,这是由于随着围压的升高,轴向应力对于试样内部孔

隙的初始压密会被限制,内部微裂隙呈现缓慢闭合,使得初始压密阶段不明显。弹性阶段初期,常规三轴和循环加卸载曲线基本保持一致,但后期常规三轴的曲线在同等应变条件下要高于三轴循环加卸载。这是由于弹性阶段初期岩石主要产生弹性变形,此阶段内部储存弹性能,基本不产生较大的损伤,所以初期二者曲线基本一致,但是到弹性阶段后期逐渐过渡到塑性破坏阶段时,由于循环加卸载存在卸载时间,会使得内部新生裂隙逐渐闭合,而在常规三轴情况下,内部新生裂隙会逐渐扩展、贯通,从而使得三轴循环加卸载下岩石的整体强度劣化会低于常规三轴。峰后破坏阶段,低围压情况下呈现脆性破坏,而随着围压的升高逐渐变为延性破坏;三轴循环载荷下峰值强度要高于常规三轴,且随着围压的升高,强度也逐渐增高,这表明循环载荷下由于存在充分的卸载时间会使得内部的岩石损伤累计程度低于常规三轴。

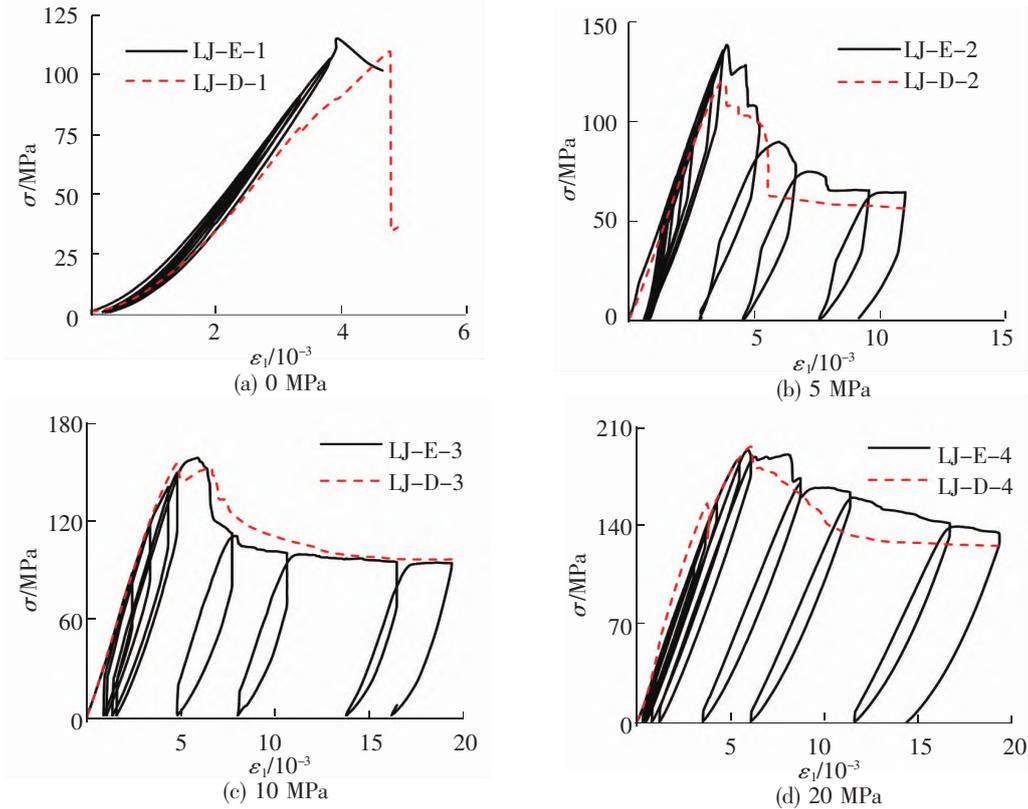


图 3 常规三轴与循环加卸载应力应变曲线

2.2 强度特征

2.2.1 峰值强度与损伤阈值

图 4 为不同围压作用下 2 种加载方案的峰值强度与损伤阈值。从图 4 可以看出,试样的峰值强度与损伤阈值均随着围压的升高而逐渐增大,其中峰值强度呈现线性增长,而损伤阈值则是与围压呈正相关,这说明围压会增加试样的承载强度,在相同应力条件下,较大的围压会限制岩石的径向变形,进而限制岩石的进一步变形,岩石需要更大应力才能达到破坏条件。相同围压下,三轴循环加卸载的峰值强度均高于常规三轴加载,说明循环载荷扰动下对于岩石的损伤要低于常规三轴加载。此外,对比 2 种加载方式的损伤阈值,除 10 MPa 处常规三轴的损伤阈值高于三轴循环加卸载,其余均低于三轴循环加卸载的损伤阈值。因此,排除试样均质性的影响,可认为三轴循环加卸载对于岩石的损伤要低于常规三轴加载。因此在地铁硐室及隧道开挖过程中要给予围岩充分的卸载时间,以降低对其损伤,提高承载强度,避免其大范围强度失稳。

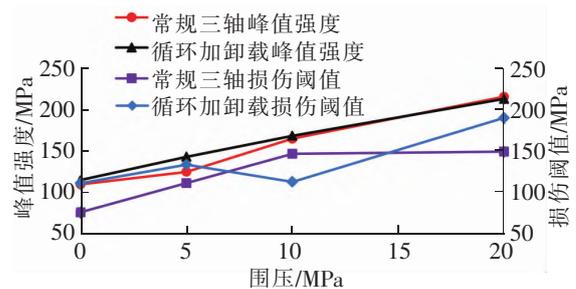


图 4 峰值强度与损伤阈值曲线

2.2.2 弹性模量与变形模量

图 5 为不同围压下,常规三轴的弹性模量与变形模量演化曲线。岩石的弹性模量是指岩石应力-应变曲线中近似直线段的斜率,反映的是岩石抵抗变形的能力。常规三轴下,随着围压的升高,岩石的弹性模量和变形模量逐渐升高,这是由于围压对于环向变形存在抑制作用,围压越高,抑制作用越明显,岩石抵抗变形的能力越强,表现为弹性模量越大;而变形模量是材料峰值点一半与坐标原点连线的斜率,围压的增加会增加岩石的峰值强度,并弱化压密阶段,使得连线斜率增大,所以变形模量也随着围压的升高而增加。此外,5 MPa 的变形模量相对于 0 MPa 呈现急剧升高,而之后则是缓慢升高,也说明了压密阶段的弱化会增大变形模量,根本原因也是围压升高引起的。

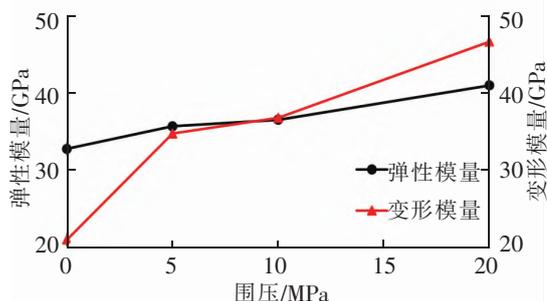


图 5 常规三轴弹性模量与变形模量曲线

图 6、图 7 分别为三轴循环加卸载下弹性模量、变形模量演化曲线。单轴加载下(0 MPa),弹性模量和变形模量随着循环次数的升高而增大;而三轴应力条件下,弹性模量先升高后降低,变形模量呈现初期波动后期降低。单轴加载下,失去了围压的限制,卸载时内部新生裂隙会被岩石颗粒及碎屑填充,之后加载压实,会一定程度增强岩石的强度,从而使得弹性模量和变形模量逐渐升高;而在三轴加载条件下,初期压密阶段岩石内部的原生裂隙逐渐被压密,岩石强度略微升高使得弹性模量逐渐升高,对于变形模量则呈现波动变化,之后的弹性阶段至峰后破坏阶段的每一次循环都对岩石造成了疲劳损伤,逐渐累积的损伤劣化了岩石的材料属性,从而使得弹性模量与变形模量逐渐降低。横向对比围压效应对于循环载荷下的弹性模量与变形模量的影响,发现与常规三轴类似,较高的围压会提高材料的弹性模量与变形模量。

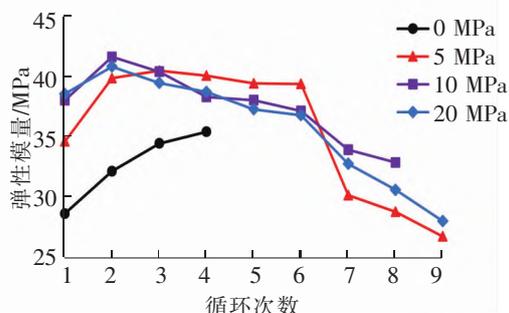


图 6 循环加卸载弹性模量曲线

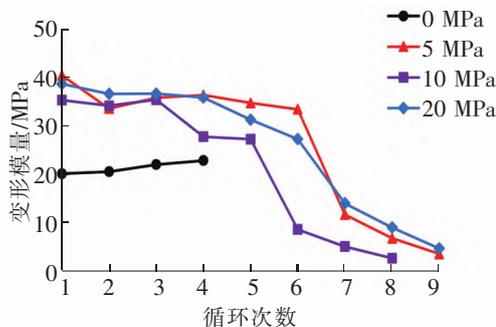


图 7 循环加卸载变形模量曲线

3 灰岩变形破坏特征分析

图 8、图 9 为 2 种加载方式下灰岩的破坏模式。从图 8、图 9 可以看出,单轴条件下(围压 0 MPa)灰岩的破坏以拉伸破坏为主,常规三轴加载方式是形成贯穿上下端面的 2 条拉伸裂纹,而循环加卸载则是形成多条拉伸裂纹。随着围压的升高,拉伸裂隙的比重开始降低,岩石宏观断裂面以剪切裂纹为主,自上而下形成斜穿岩石的破坏面。这是由于单轴条件下,缺少围压的限制作用,使得岩石径向变形更容易,试样只承受垂直于上下端面的轴向压力,从而主断面以拉伸裂纹为主,而随着围压的升高,岩石径向和轴向承受应力,其岩石内部的合力是偏离轴向的,因此形成的宏观断裂面以剪切裂纹为主,且围压越高,剪切裂纹比例越高。由于徐州地铁的灰岩层节理发育,使得岩石破坏的宏观断裂面大多沿着节理发育的方向或者向节理附近延伸,因此对于隧道围岩节理发育地段需要注浆填充节理面,加固围岩,对于围岩破碎地段还应当使用锚固锚索联合支护,以保证地下工程的稳定。



图 8 常规三轴下灰岩破坏模式

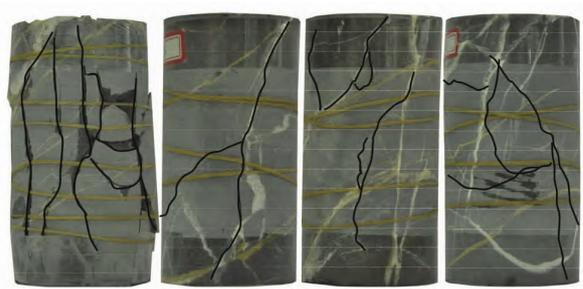


图 9 三轴循环加卸载下灰岩破坏模式

对比相同围压下,常规三轴和循环加卸载灰岩的破坏模式发现,循环载荷下的岩石裂纹贯通网络明显要比常规三轴的复杂,在主裂纹附近衍生了较多的次生裂纹,从而形成了较为复杂的裂纹贯通模式。这是因为循环载荷作用下,岩石内部的新生裂纹会重复张开-闭合,在这个过程中,岩石内部的应力场会不断地变化,使得内部裂纹的产生更加无序,导致形成复杂的裂纹网络,而对于持续加载直至破坏的常规三轴,持续加载使得新生裂纹的尖端应力集中,持续向主应力方向扩展,因而形成的次生裂纹较少,主断面的裂纹贯通模式相对于循环加卸载下的更为简单。

4 灰岩变形能量演化特征分析

岩石变形破坏过程中的能量耗散是使岩石产生损伤,导致岩性劣化和强度丧失,引发岩石整体突然破坏的内在原因,因此需要深入分析循环加卸载过程中的能量演化特征。

忽略油压做功,岩石加载过程中一个循环内总能量、弹性能量和耗散能量满足

$$U = U_e + U_d \tag{1}$$

式中, U 为 1 个循环内输入的总能量密度; U_e 为 1 个循环内储存的弹性能量密度; U_d 为 1 个循环内耗散能量密度。

如图 10 所示,加卸载曲线各部分能量的计算方法如下

$$U = U_e + U_d = \int_{\epsilon_1}^{\epsilon_2} \sigma d\epsilon + \int_{\epsilon_2}^{\epsilon_3} \sigma d\epsilon \tag{2}$$

式中, ϵ_1 为 1 个循环内加载的起始应变; ϵ_2 为 1 个循环内加载的应变上限; ϵ_3 为 1 个循环内卸载的应变下限。

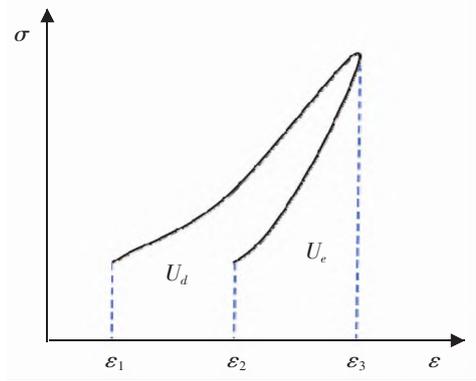


图 10 循环阶段能量示意图

图 11 为灰岩三轴循环加卸载过程中总能量密度、弹性能量密度和耗散能量密度演化曲线,从图 11 可以看出,随着循环次数的增大和外部施加载荷的升高,总能量密度逐渐增大,同一循环内,围压较高的,总能量密度也较大。加载初期由于外部施加载荷较小,所以总能量密度较小,上升速率也较小,随着外部应力的快速增加,单个循环内总能量密度也快速增加,且围压越大总能量密度上升速率越大。

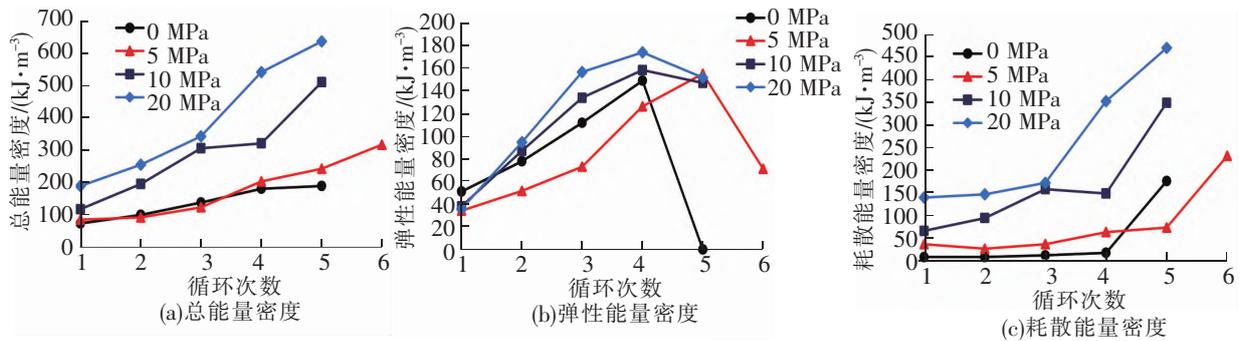


图 11 循环加卸载能量演化曲线

弹性能量密度随着循环次数的增加呈现先升高后降低的趋势,加载初期岩石内部以弹性应变为主,此时内部储存弹性能量较多,单个循环内弹性能量密度不断增加,且增加速率也较大,而随着岩石内部的损伤逐渐累计,弹性能量占比逐渐降低,单个循环内弹性能量密度虽然在逐渐增大,但是累计速率却在逐渐降低。在达到峰值应力后,灰岩内部裂隙相互贯通,岩石内部损伤严重,弹性能量密度迅速下降。

耗散能量密度随着循环次数的增加呈现先缓慢增加,达到峰值应力后迅速升高的趋势。这是由于在加载初期内部以弹性变形为主,并伴随少量微裂隙的产生,此时岩石内部损伤较小,所以单个循环内耗散能量密度缓慢增加,而随着外部载荷的不断升高,岩石内部较大尺度的裂隙开始发育,导致耗散能量占比逐渐增大。随着裂隙的不断发育、贯通,岩石内部损伤加剧,耗散能量累计速率快速增加,在峰后耗散能量累计速率达到峰值。因此,单个循环内弹性能量快速降低和耗散能量快速升高可作为岩石破坏的前兆信息。

5 结论

针对徐州地铁地层中的灰岩进行了常规三轴和三轴循环加卸载试验,确定了灰岩的力学特性、变形破坏及能量演化特征,具体结论如下:

(1)灰岩常规三轴和三轴循环加卸载的峰值强度、损伤阈值、弹性模量和变形模量均随着围压的升高而增大,且随着围压的增大,峰后由脆性破坏转变为延性破坏。三轴循环加卸载下灰岩试样由于有充足的卸载时间,使得内部的岩石损伤累计程度低于常规三轴。

(2)灰岩常规三轴和三轴循环加卸载下岩石的破坏模式均是随着围压的升高逐渐由拉伸破坏为主转变为以剪切破坏为主,但三轴循环加卸载下岩石的破坏模式相比于同围压下的常规三轴岩石更为复杂,岩样表明宏观裂隙更多。

(3)灰岩三轴循环加卸载总能量密度随循环次数的升高逐渐增大,同一循环内,围压较高的,总能量密度也较大;弹性能量密度随着循环次数的增加呈现先升高后降低的趋势;耗散能量密度随着循环次数的增加呈现先缓慢增加,达到峰值应力后迅速升高的趋势。单个循环内弹性能量快速降低和耗散能量快速升高可作为岩石破坏的前兆信息。

参 考 文 献

- [1]黄彦华. 深部盐水环境下砂岩变形破坏特性及 CO₂ 渗透演化规律研究[D]. 北京:中国矿业大学, 2018.
- [2]李兵磊, 远彦威, 曹洋兵, 等. 冲击载荷下灰岩的动力学特性及能量耗散规律[J]. 金属矿山, 2021(8): 61-66.
- [3]胡芳江. 惠民庄水库坝基裂隙灰岩水-力耦合作用下渗漏特性分析[J]. 水利技术监督, 2021(4): 114-117.
- [4]马涛, 丁梧秀, 王鸿毅, 等. 酸性水化学溶液侵蚀下不同矿物成分含量灰岩溶解特性及力学特性研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(8): 1550-1557.
- [5]张牧子, 孙永福, 宋玉鹏, 等. 单轴压缩条件下溶蚀礁灰岩细观变形破坏特征研究[J]. 计算力学学报, 2021, 38(2): 222-229.
- [6]余兴建, 李晓昭, 吴云, 等. 高温作用后灰岩物理力学性质变化试验研究[J]. 人民长江, 2020, 51(11): 196-202.
- [7]郑建国, 乔建伟, 唐国艺. 珊瑚礁灰岩的透水特性和基坑降水措施研究[J]. 岩土工程技术, 2020, 34(5): 286-289.
- [8]熊良宵, 汪子华. 中低应变加载速率下单节理裂隙岩体的单轴动态压缩力学性能试验[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2020, 33(2): 24-32.
- [9]满令聪, 娄国充, 孙志涛. 山岭隧道定向超前地质预报人工地震波传播规律研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2020, 33(4): 88-92, 114.

Study on Triaxial Mechanical Properties and Energy Evolution Characteristics of Limestone Under Cyclic Load

Chen Chuanping

(The 4th Engineering Co. Ltd. of the 20th Bureau Group of China Railway, Qingdao 266000, China)

Abstract: Triaxial mechanical properties and deformation failure characteristics of rock are of great significance to guide the stability of underground engineering. Conventional triaxial and triaxial cyclic loading and unloading experiments were carried out on the limestone in Xuzhou Metro stratum. Based on the confining pressure change, the stress-strain curve, strength characteristics, failure mode and energy evolution characteristics were analyzed, and the mechanical properties and energy evolution characteristics of the limestone were determined. The concrete conclusions are as follows: The increase of confining pressure will gradually increase the elastic modulus, deformation modulus, peak strength, and damage threshold of limestone, also cause the failure mode of specimen to change from tensile failure to shear failure. The deterioration degree of material properties of limestone under triaxial cyclic loading and unloading is lower than that under conventional triaxial loading and unloading, and the crack penetration network is more complex than that under conventional triaxial loading and unloading. The energy evolution shows different trends in the process of cyclic loading and unloading, which can be regarded as the precursory information of rock failure according to the rapid decrease of elastic properties and the rapid increase of dissipated energy in a single cycle. The research results can provide some guidance for the excavation and support of Xuzhou Metro tunnels and chambers.

Key words: limestone; triaxial mechanics; deformation and failure characteristics; confining pressure effect; cyclic load

(上接第 31 页)

Experimental Study on Interference Effect of Wind Load on Parallel Double Coal Shed

Chen Juan¹, Ma Mixue¹, Cui Huimin^{2,3,4}, Han Zhiming^{1,2,3}, Liu Qingkuan^{1,2,3}

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of

Traffic Engineering Structures, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

3. Innovation Center for Wind Engineering and Wind Energy Technology of Hebei Province, Shijiazhuang 050043, China;

4. Department of Mathematics and Physics, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Long-span coal shed structures are sensitive to wind loads. A rigid model pressure measurement wind tunnel test was carried out for a closed double coal shed in this research. The distribution law of wind load shape coefficient at the structural surface measuring points was studied under three different spacing ratios L ($L=0.125, 0.250, 0.500$). The most suitable arrangement and the most unfavorable wind direction angle of the double coal shed were proposed. It is found that when the coal shed is placed in parallel, the influence of interference on the target coal shed decreases with the increase of spacing ratio. The wind direction parallel to the long axis is the most unfavorable wind direction angle, and the narrow tube effect dominates at this time. The wind direction perpendicular to the long axis is the most favorable wind direction angle, and the occlusion effect plays a leading role. When the coal shed is placed in parallel and the spacing ratio $L=0.125$, the shape coefficient of the target coal shed is within the scope of the specification requirements. Considering the factor of saving space, the coal shed can maintain the spacing ratio $L=0.125$.

Key words: large-span coal shed; wind tunnel test; body shape coefficient; interference effect