DOI:10.19431/j. cnki. 1673-0062.2020.05.002

加载速率对含预制锯齿状结构面类岩石试件力学性质的影响研究

马艾阳1,2,王 波1,3,孔德铭1,韩世礼1,2*,段先哲1,2,李玲珂1

(1. 南华大学 资源环境与安全工程学院,湖南 衡阳 421001;2. 稀有金属矿产开发与废物地质处置技术 湖南省重点实验室,湖南 衡阳 421001;3. 东华理工大学 地球科学学院,江西 南昌 330013)

摘 要:采用 RMT-150B 岩石力学电液刚性伺服控制试验系统对含预制锯齿状结构 面类岩石试件进行了单轴压缩试验,包括4级不同的加载速率,定量地分析了加载速 率对峰值强度及加载速率对应变等物理力学性态的影响。结果表明,在静态加载速 率下,含预制锯齿状结构面类岩石试件的峰值强度与加载速率呈非线性正相关,峰值 强度以及对应的应变值与加载速率呈非线性负相关,破坏形式为沿结构面滑动剪切 啃断式破坏,锯齿啃断面积基本随应变速率增大而增加。 关键词:锯齿状结构面;加载速率;峰值强度;锯齿啃断面积 中图分类号:P554 文献标志码:A

文章编号:1673-0062(2020)05-0009-05

Effect of Loading Rate on Mechanical Properties of Surface Rock Specimens with Prefabricated Serrated Structure

MA Aiyang^{1,2}, WANG Bo^{1,3}, KONG Deming¹, HAN Shili^{1,2*}, DUAN Xianzhe^{1,2}, LI Linke¹

(1. School of Resource Environment and Safety Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China; 2. Hunan Key Laboratory of Rare Metal Minerals Exploitation and Geological Disposal of Waste, Hengyang, Hunan 421001, China; 3. School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang, Jiangxi 330013, China)

Abstract: According to uniaxial compression deformation test on concrete samples with precast serrated structural surface under 4 different loading rate by RMT-150B rock mechanics

作者简介:马艾阳(1983-),男,讲师,博士,主要从事工程地质、岩石力学等方面的研究。E-mail:maaiyang0301@ 163.com。*通信作者:韩世礼(1979-),男,讲师,博士,主要从事地球物理、地质工程等方面的研究。Email:51432140@qq.com

收稿日期:2020-07-02

基金项目:湖南省自然科学基金项目(2018JJ2327);大学生研究性学习和创新性实验计划项目(S201910555111; 2017XJXZ014;2018XJXZ058)

experimental system, influence of loading rate on peak strength as well as the corresponding strain was analyzed quantitatively. Conclusions were drawn:1)Under the static loading rate, the peak strength has a nonlinear positive correlation with the loading rate;2) The peak strength as well as the corresponding strain is negatively correlated with the loading rate;3) The failure mode is sliding shear and nibbling failure along the structural surface, and the area of nibbling failure basically has a nonlinear positive correlation with the loading rate. **key words**:serrated structural plane;loading rate;peak strength;the area of nibbling failure

0 引 言

随着国家矿产与水电资源的开发利用,以及 交通运输工程、城市基础工程与国防工程中地下 空间的利用与建设,很多大型工程所涉及的工程 地质条件越来越复杂,因此,相应岩体力学问题所 带来的挑战显得越来越艰巨。

在岩石力学中,加卸载速率是实验的基本参数之一,对不同的工程问题,这一参数是变化的。 在采矿爆破过程中,岩体的卸载速率往往为每秒 几分之一量级,与之相比,地下采矿巷道和矿柱的 变形增量相对较小,仅达到 0.10~0.15 mm/a^[1]。 加载速率能够影响材料破坏形态,包括局部破坏 失稳和全面破坏失稳,岩爆就是后者的表现形式 之一^[2]。加载速率越高材料破损程度越高;岩石 峰值强度和变形参数随应变率的提高而提高^[2]。 通过刚性加载条件下岩石的变形全过程记录,陈 升强等指出,与应变速率较低的峰值后卸荷刚度 相比,应变速率较高的岩石峰值后卸荷刚度明显 要小^[3]。岩石力学基本研究任务就包括不同应 变速率条件下岩石材料的力学效应分析。

作为地质体的一部分,岩体的力学性质不仅 与结构体有关,还深受各类先存结构面的影响。 与完整的岩石试件相比,含节理的岩石试件的力 学参数均在不同程度上降低,其中,弹模、抗压强 度、黏聚力等随节理倾角变化而表现为高— 中低—高的U型分布,60°倾角节理的试件的力 学试验中出现上述几个岩石力学参数的最小 值^[4-5]。锯齿状岩体结构面的剪切变形模式包括 3种,分别为爬坡、爬坡啃断与啃断,而相应产生 的微破裂损伤、耗散能量依次增多^[6]。当裂隙含 充填的节理试件的峰值强度提高、峰后塑性变形 能力增强^[7-9],卸荷条件下节理试件和完整试件的 力学特性不同^[10]。通过对含有非贯通节理的水泥 砂浆试件的单轴压缩试验研究,P. L. P. Wasantha 等指出节理位置、节理倾角和节理迹长均对单轴 抗压强度都有影响^[11]。

总的来说,具有先存结构面的岩体和完整岩体的力学性质有较大差异。

1 试验概况

1.1 试件制备

采用的模型材料质量配比为复合硅酸盐水 泥:细沙:水=23:19:10,细沙经孔径为 0.5 mm的筛晾干筛分,以保证结构面制作时较好 成形且质地均匀。试件模具为钢制(如图1所 示),试件为长方体试件,其尺寸为100 mm× 50 mm×50 mm。



图1 试验所用铁质模具与结构面制作模具

Fig. 1 The iron mould used in the test and the mould with the structural surface

锯齿状结构面的实现是通过一块含有与之相 似结构面的钢块来实现;将制作好的两块水泥试 件按结构面对应拼接,构成一个截面为 50 mm× 50 mm;长度为 100 mm,内部含与水平面成 60°角 的长方体类岩石试件。在试件制作完成后 24 h 时拆模,拆模后检查结构面的完整性及试件的完 好性,剔除破损试件和尺寸不合格试件。对合格 试件进行养护箱养护,养护时间为 28 d,取出静置 于通风处 1 d,然后进行力学加载试验。

1.2 实验设备与加载条件

本次试验加载设备为 RMT-150B 岩石力学试 验机。其原始加载头足以完全覆盖长方体的截面 50 mm×50 mm,故加载时不用添加加载板。由于 结构面角度较倾斜(60°),所以加载时破坏形式 为结构面滑动破坏^[4]。故在加载前需要将拼接 好的长方体试件用透明胶带缠绕一圈半,防止加 载后移动试件造成结构面的二次破坏。

1.3 实验设计和结果

本次实验的加载速率设定为 0.1,0.2,0.5, 1.0 kN/s 等4 级,每级对应4 个试件,共计16 件。 每一级下的四组试件都是随机分配的。实验结果 见表1,峰值强度、峰值对应应变值和峰值后割线 模量均为算术平均值。

loading rates						
Table 1	Mechanical parameters under differen	11				
表1	不同加载速率所对应的实验结果					

		-	
序号	加载速率 <i>V/</i> (kN・s ⁻¹)	峰值强度 $\sigma_{\scriptscriptstyle max}$ / MPa	峰值对应应变 $\varepsilon_{\sigma_{\max}}/\times 10^{-3}$
1	0.1	5.664	4.20
2	0.2	6.248	4.17
3	0.5	7.432	3.40
4	1.0	10.160	3.20

2 试验结果及分析

2.1 加载速率对应力—应变全过程曲线的影响

四级加载速率相对应的应力—应变全过程曲 线见图 2,由于试验中每级加载速率下分别对应 4 件样品,为了使所绘制的曲线具有代表性,并能客 观显示试验结果,因此将同一级加载速率下的数 据加以求平均值整理后再绘制该曲线。

由图2所示,结构面的存在并没有改变岩石 应力—应变曲线的总体形态,即岩石的应力—应 变曲线一般可分为4个阶段,包括压密阶段、弹性 变形阶段、塑性变形阶段和破坏变形阶段。在加 载的初期,最大主应力方向的应变随最大主应力 的增加而增加,曲线表现为上凹形,这是由于类岩 石试件中的锯齿状结构面压密而产生的;并且在 加载速率较高的情况下,压密阶段的应变量较小 (应力—应变曲线第一个拐点靠前),这是由于在 该阶段加载速率越高,压力导致的次生裂隙较少。 随后,锯齿状结构面闭合,应力应变关系则具有近 似于线性弹性的性质。随着不断加载进入塑性变 形阶段,该阶段随加载速率增高对应应变量减少, 因为加载速率的提高抑制了材料破损过程中优势 剪切带的发展^[12]。当应力超过试件的最大承载 力时,试件开始破裂,应力—应变曲线表现为急转 直下。





under different loading rates

2.2 加载速率对峰值强度的影响

峰值强度即试件的单轴抗压强度。按表1所 示的4级加载速率,对相同加载速率的试样的峰 值强度值进行平均,得出4级加载速率下的平均 峰值强度。每组试件在不同加载速率下的曲线如 图3。随加载速率的提高峰值强度也随即增加, 这是因为在相对高的加载速率下试件内部的微裂 纹或锯齿剪断来不及充分发育就发生了最终的剪 切破坏——对应的剪切面积较大,故峰值强度高, 而在相对低的加载速率下试件内部的微裂纹或锯 齿剪断可相对充分地扩展,最终的剪切破坏对应 的剪切面积较小,故峰值强度低。

峰值强度不是随加载速率的增大而线性增加 的,即非线性增长,如图4所示。







图 4 不同加载速率下试件的峰值强度关系曲线 Fig. 4 Relation curve of peak strength of specimens under different loading rates

2.3 加载速率对峰值强度对应的位移的影响

峰值强度对应的应变是指试件达到峰值强度 时所对应的应变,该值是岩体工程建设中应进行 直接的测量并应控制的物理量。

如图 5 所示,峰值强度对应的应变量与加载 速率呈非线性关系,并且随加载速率升高,峰值强 度对应的应变量降低,两者之间表现为负相关性, 但是,4 种加载速率下的峰值强度对应的位移相 差较小。当加载速率较大时,试件内部的微裂纹 与锯齿啃断未能充分发育,损伤较低;在低加载速 率下,由于试件内部微裂纹与锯齿具有充足的变 形破坏时间,微裂纹与锯齿的变形破坏相对更多, 损伤较高。内部的微裂纹的发育与加载速率之间 的关系,是导致上述负相关性的根本原因^[13]。







2.4 加载速率对试件破坏的影响

由于技术的限制,预制裂隙多设计为光滑的、 未切断整个试件的,该类含预制裂隙的试件破坏 方式往往表现为微裂纹的集中—宏观裂纹出 现^[14],或者不同参数的裂隙条件下新生裂纹的张 拉类型、剪切类型和混合类型之间的转换^[15-16]。 而本试验的试件破坏主要沿预制裂隙面发生剪 断—剪切破坏。

对4种加载速率下破坏的试件进行破坏情况 统计;对试件的两个结构面进行破坏百分比统计, 且将四组试件的统计结果求平均值,最后统计结 果见表2。

Table 2 Statistics of specimen failure under different loading rates						
序号	加载速率/ (kN・s ⁻¹)	试件破坏特征	结构面1啃断面积 百分比/%	结构面2啃断面积 百分比/%		
1	0.1	试件破坏均是沿锯齿状结构面滑动剪切	89.0	92.5		
2	0.2		91.9	93.5		
3	0.5	啃断式破坏;均未见产生明显的宏观裂隙	94.0	95.0		
4	1.0		91.5	92.0		

表 2 不同加载速率下试件破坏情况统计 Cable 2 Statistics of specimen failure under different loading rat

总的来说,局部化带(锯齿状结构面)主导了 试件的破坏。对不同加载速率结构面破坏的百分 比进行比较,可以发现,除1.0 kN/s 这组试件外, 随着加载速率的增大,结构面啃断面积百分比也 逐步增加。这种例外可能与测试试件数量及试件 制作水平有一定关系。

3 结 论

1)4种加载速率对含先存锯齿状结构面类岩 石试件的影响与其它岩石类材料在不同加载速率 表现出的力学性质大致相同,即应力—应变曲线 的形态—致,各个阶段展现出来的力学规律一致。

2)加载速率对含先存锯齿状结构面类岩石 试件的峰值强度影响较大,其峰值强度与加载速 率呈非线性正相关的关系。

3)峰值强度对应的应变量与加载速率呈非 线性负相关的关系;加载速率较大时,锯齿啃断没 有充分发育,故损伤变形较小。

4)不同加载速率下观测到的试件破坏形式 只有一种,其破坏形式为沿结构面滑动剪切啃断 式破坏。除1.0 kN/s 这组试件外,随着加载速率 的增大,结构面啃断面积百分比也逐步增加。

致谢:感谢蒲成志博士及其研究生在试验过 程中提供了较多指导和帮助!也感谢杨帆、陈道 龙、孙梦瑶同学在试件制备过程中提供了较多 支持!

参考文献:

- [1] 孙旭曙,李建林,王乐华,等. 单一预制节理试件各向 异性力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015,34(增刊1):3018-3028.
- [2] 尹小涛. 法国马尔帕塞拱坝失事的启示[J]. 水力发 电学报,1998,17(4):96-98.
- [3] 陈升强. 意大利瓦依昂水库滑坡事件的启示[J]. 中

国地质灾害与防治学报,1994,5(2):77-84.

- [4] 杨仕教,曾晟,王和龙.加载速率对石灰岩力学效应的 试验研究[J]. 岩土工程学报,2005,27(7):786-788.
- [5] 李永盛. 加载速率对红砂岩力学效应的试验研究 [J]. 同济大学学报,1995,23(3):265-269.
- [6] 黄达,黄润秋,雷鹏.贯通型锯齿状岩体结构面剪切变 形及强度特征[J].煤炭学报,2014,39(7):1229-1237.
- [7] 刘红岩,黄妤诗,李楷兵,等. 预制节理岩体试件强度 及破坏模式的试验研究[J]. 岩土力学,2013,34(5): 1235-1241.
- [8] 李建林,王乐华.节理岩体卸荷非线性力学特性研究 [J].岩石力学与工程学报,2007,26(10):1968-1975.
- [9] 张波,李术才,张敦福,等.含充填节理岩体相似材料 试件单轴压缩试验及断裂损伤研究[J].岩土力学, 2012,33(6):1647-1652.
- [10] 王瑞红,李建林,蒋昱州,等.含预制节理岩体卸荷条件下力学特性试验研究[J]. 岩土力学,2012,33(11):3257-3262.
- [11] WAHANTHA P L P, RANJITH P G, VIETE D R, et al. Influence of the geometry of partially-spanning joints on the uniaxial compressive strength of rock [J]. International journal of rock mechanics and mining sciences, 2012,50:140-146.
- [12] 尹小涛,葛修润,李春光,等.加载速率对岩石材料力
 学行为的影响[J].岩石力学与工程学报,2010,29
 (1):2610-2615.
- [13] 罗可,招国栋,曾佳君,等.加载速率影响的含裂隙类 岩石材料破断试验与数值模拟[J].岩石力学与工 程学报,2018,37(8):1833-1842.
- [14] 李建旺. 基于数字图像技术的含双预制裂隙类岩石 试样力学特性细观研究[J]. 中国矿业, 2020, 29 (9):168-174.
- [15] 周喻,孙铮,王莉,等.单侧限压缩下预制裂隙试样力
 学特性及板裂化机制细观研究[J]. 岩土力学,
 2018,39(12):4385-4394.
- [16] 朱栋,靖洪文,尹乾,等.含弧形预制裂隙砂岩力学特 征试验研究[J].煤炭学报,2019,44(9):2721-2732.