

类岩石锚固体单轴抗压强度与 声波波速的相关性

曾国正¹, 王斌^{1,2,3}, 曾泽民¹, 陈仲之¹, 贾古宁¹, 裴云龙¹, 叶洲元¹

- (1. 湖南科技大学 能源与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;
2. 中国矿业大学(北京) 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 北京 100083;
3. 湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 类岩石锚固体声波波速与其强度特性的研究较少, 针对类岩石锚固体试样制作的特殊性, 结合室内单轴压缩试验, 利用声波测试技术分析类岩石锚固体单轴抗压强度与声波波速的关系特点. 无论标准试样有无锚固或相似原料配比变化, 纵波波速增大, 单轴抗压强度也相应随着增大. 锚杆轴向布置和横向布置均能提高试样的单轴抗压强度, 但提高的幅度很相近, 这可以通过两种加锚方向的试样纵波波速变化不大来反映. 对比类岩石锚固体试样单轴抗压强度随试样密度和纵波波速的变化关系, 纵波波速的影响更显著.

关键词: 类岩石锚固体; 单轴抗压强度; 纵波波速

中图分类号: TU45 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9102(2014)04-0033-04

Experiment research on the correlation between uniaxial compressive strength and acoustic velocity of the rock – like anchorage body

ZENG Guozheng¹, WANG Bin^{1,2,3}, ZENG Zemin¹, CHEN Zhongzhi¹, JIA Guning¹, PEI Yunlong¹, YE Zhouyuan¹

- (1. School of Energy and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;
2. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing, 100083, China;
3. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: There is less research on the acoustic velocity and strength characteristics of rock – like anchorage body. Aiming at the particularity of the rock – like anchorage sample, the relationship between the uniaxial compressive strength and acoustic velocity of the rock – like anchorage body are discussed by means of the acoustic testing technique combined with the uniaxial compression experiments. No matter its anchorage or its similarity material proportion, the longitudinal wave velocity of the standard sample increases corresponding with the increase of its uniaxial compressive strength. Both the axial arrangement and the cross arrangement of bolt can increase the uniaxial compressive strength of the sample, but all the increase amplitudes are very close, which can also be reflected by the slight change of longitudinal wave velocity under different anchorage. Compared with the change of uniaxial compressive strength along with the sample density and the longitudinal wave velocity, the influence of the latter is more significant.

Key words: rock – like anchorage body; uniaxial compressive strength; longitudinal wave velocity

收稿日期: 2014-08-07

基金项目: 湖南省大学生研究性学习和创新性实验计划资助项目(201310534001); 湖南省普通高等学校教学改革研究资助项目(2012-246); 湖南省教育厅资助项目(12B045; 12CY013); 湖南省科技厅资助项目(2013TP4057-2)

通信作者: 王斌(1975-), 男, 广东梅县人, 博士, 副教授, 研究方向: 采矿与岩石力学. E-mail: wb21c@sina.com

锚杆支护作为一种解决洞室围岩稳定问题的有效手段,广泛应用于各种工程领域,目前通过室内相似试验制作类岩石锚固模型来研究锚杆锚固作用机制的方法已经很普遍^[1].类岩石锚固体是基于相似理论采用相似材料来模拟加锚岩体性质的试件.在进行锚固相似模拟试验中,为使类岩石锚固材料与原型材料符合相似定律,须合理配比得到合适的类岩石锚固体强度特性,但相同材料的相同配比条件下,会因为制作时间、工艺和养护时间的不同,导致类岩石锚固体试样强度指标的改变,使得相似模型试验误差偏大.岩体力学指标与岩体声波传播规律之间的关系日益受到重视,同时声波检测法对试样的无损特性,该方法被充分应用于围岩岩体分类、结构状态、物理力学性质的研究中,何国梁进行了砂岩高温前后的超声测试试验^[2],樊秀峰研究了砂岩疲劳特性的超声波速特点^[3].因此针对类岩石锚固岩体试样制作的特殊性,利用声波测试技术可成为降低相似模型试验误差的一条途径.目前有关类岩石锚固体声波波速与其强度特性的研究较少,本文利用声波测试技术,对按一定配比制成的类岩石锚固体标准试样进行声波波速测量,并结合室内单轴压缩试验,分析类岩石锚固体单轴抗压强度与声波波速的关系特点.

1 岩体声波测试技术

岩体声波测试是以岩石力学特性为基础,研究声波或超声波在岩体内的传播规律,借以了解岩体的动弹力学状态及其结构特征,为评价工程岩体力学性质提供依据.声波在无限介质传播时,只有纵波和横波,当介质中存在自由面时,会产生瑞利波等面波,在岩石工程中,目前应用较普遍的是纵波波速和横波波速.岩体不是理想均匀介质,但从工程角度考虑,当声波波长远小于岩体空间尺寸时,纵波波速 V_p 和横波波速 V_s 与介质性质存在如下关系^[4]:

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}}; \quad (1)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\mu)}}. \quad (2)$$

式中, E :材料弹性模量; ρ :材料介质密度; μ :材料泊松比.

一般来说,纵波传播速度快,易于识别,而横波传播速度较慢,受到纵波余波的干扰,识别比较困难.文献^[5]研究灰岩模拟材料表明,纵波波速比横波波速能更好地反映模拟试样的力学特性.因此,采用纵波波速测试类岩石锚固体更简单适用,

其所采取的“直达波法”所接收的信号能量强,直至波清晰易识别,测试精度高.

2 类岩石锚固体试样制作与试验设备

2.1 类岩石锚固体试样制作

本试验目的是为了研究脆性岩石的性质,根据相似原理,结合类岩石锚固体相关研究^[1,6],以C325标号水泥、建筑石膏、松香、湘江细河砂为原料制作类岩石锚固体,按重量对各原料进行配比,比例为水泥:沙:水:石膏:松香=1.00:5.27:1.00:0.20:0.05;选用经过压花处理的直径1.5 mm铜丝作为锚杆的相似材料,试样模具为定制的铁质三开模具,以制作 $\Phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 圆柱体标准试样.经过称量、搅拌、填模、成型、拆模和养护,根据静态力学性能测试要求,制得符合要求的无锚试样、横向锚固试样和轴向锚固试样各4个,锚固试样采用单筋布置锚杆,如图1所示.

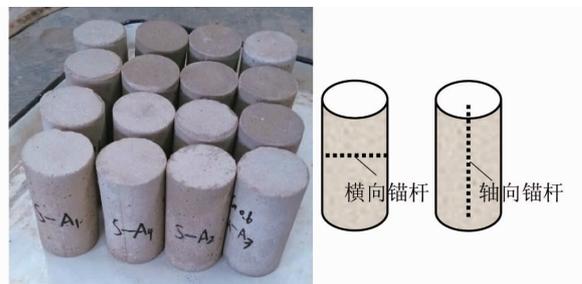


图1 类岩石锚固试样

2.2 单轴压缩试验设备

本单轴压缩试验采用中科院武汉岩土所生产的RMT-150C电液伺服岩石力学试验系统进行(图2).该试验系统是专为岩石和混凝土类的工程材料进行力学性能试验而设计的,配置了14路传感器,能够在加载过程中从试样轴向和横向记录加载荷载、应力、应变、位移等参数.试验的加载方式采用沿轴向的位移加载,加载速度为0.005 mm/s,并采用高清数码相机对加载破坏过程进行记录.



图2 RMT-150C 试验设备

2.3 声波测试设备

声波测试试验采用 SYC-2 型声波岩石参数测定仪和 150kc 型纵波换能器,该测试仪器专为室内模拟及岩样试验设计,具有轻便、快速、精确度高的特点,在室内和现场试验已有广泛应用^[7]. 通过仪器测量纵波在岩体中的走时 T_x ,根据所测试的岩体的长度 L (收发点间的距离),可确定纵波在试件中的传播速度为

$$V_p = L/T_x \quad (3)$$

式中, V_p : 岩体纵波波速; L : 测试岩体长度; T_x : 走时.

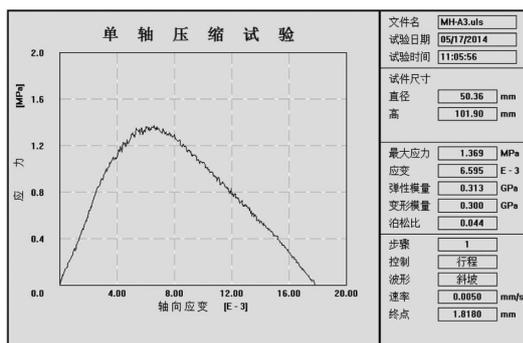
3 试验结果与分析

3.1 试验结果

在对所有类岩石锚固试件单轴压缩破坏前,进行声波测试,为减少外界空气及其他因素造成的声能损耗,换能器与试样通过黄油耦合接触,通过观察 SYC-2 型测定仪动时标尖脉冲的前沿得出走时 T_x . 测试所得各试样的纵波波速如表 1. 随后,在 RMT-150C 电液伺服岩石力学试验系统以加载速度 0.005 mm/s 进行单轴压缩试验,图 3 为类岩石锚固试样的破坏情况和相应的应力-应变曲线,各试样的单轴抗压强度亦由表 1 列出.



(a) 锚固试样破坏情况



(b) 应力应变曲线

图3 锚固试样破坏情况

表1 类岩石锚固体物理力学指标

试样	编号	尺寸($\Phi \times L$) /mm	密度 /(kg/m ³)	V_p /(m/s)	抗压强度 /MPa
轴向锚固	MZ-A1	50.58 × 101.82	1 656	1 374	1.348
	MZ-A2	50.22 × 100.60	1 630	1 387	1.356
	MH-A1	50.50 × 101.06	1 626	1 404	1.358
横向锚固	MH-A3	50.36 × 101.90	1 638	1 415	1.369
	MH-A4	50.76 × 100.46	1 645	1 453	1.405
无锚固	S-A2	50.56 × 101.33	1 546	1 164	0.631
	S-A3	50.56 × 101.62	1 537	1 208	0.670
	S-A4	50.56 × 101.50	1 578	1 181	0.573
无锚固 (无松香)	P-A1	50.56 × 100.28	1 791	2 331	2.720
	P-A2	50.30 × 100.26	1 766	2 275	2.562

3.2 单轴抗压强度与纵波波速的关系

将类岩石锚固体试样与无锚固体试的单轴抗压强度 σ_c 与纵波波速 V_p 进行比较,采用二阶多项式关系拟合,它们的相关系数为 0.99,拟合曲线如图 4 所示. 其拟合公式为

$$\sigma_c = -1.58V_p^2 + 7.28V_p - 5.77 \quad (4)$$

式中, σ_c : 单轴抗压强度.

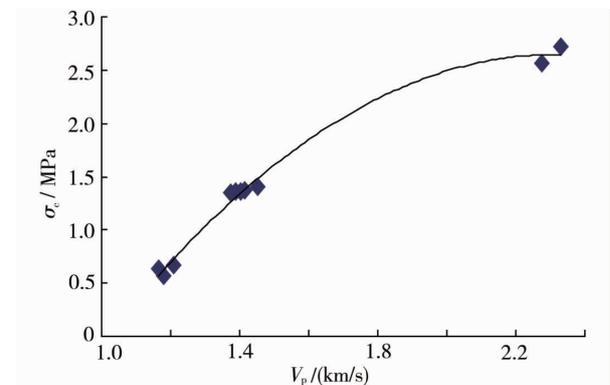


图4 试样强度与纵波波速的关系

从图 4 可以看出,无论标准试样有无锚固或相似原料配比变化,纵波波速 V_p 增大,单轴抗压强度 σ_c 也相应随着增大. 类岩石锚固试样的强度比无锚固试样的强度有明显提高,纵波波速也相应提高. 由于在试样中加入松香,松香作为引气剂,会增加试样中的孔隙,使得无松香试样的强度比加松香的锚固试样和无锚固试样有很大程度提高,无松香试样的纵波速度也比二者相应增大. 这表明,分析类岩锚固试样强度与弹性波的关系时,是可以通过纵波波速进行分析判断的,因此进行相关锚固模拟试验时,可以采取声波检测技术对试验过程校正检验,以正确估计试验误差.

3.3 锚固方向、密度对纵波波速的影响

类岩石锚固体试样的锚杆轴向布置和横向布置均能提高试样的抗压强度,但提高的幅度很相

近,这可以通过两种加锚方向的试样纵波波速变化不大来反映,在1 626 ~ 1 656 m/s的范围波动,这表明锚固方向对纵波波速影响不大。

密度对相似材料的强度有较大影响^[8],故分析类岩石锚固体试样密度 ρ 和试样单轴抗压强度 σ_c 的关系,同样采用二阶多项式关系拟合,它们的相关系数为0.97,其拟合曲线如图5所示.其拟合公式为

$$\sigma_c = -7.02\rho^2 - 14.67\rho + 6.52. \quad (5)$$

从图5可以看出,试样密度 ρ 增大,单轴抗压强度 σ_c 也相应随着增大,这与文献[8]研究成果一致,对比图4,单轴抗压强度 σ_c 随纵波波速 V_p 的变化更明显。

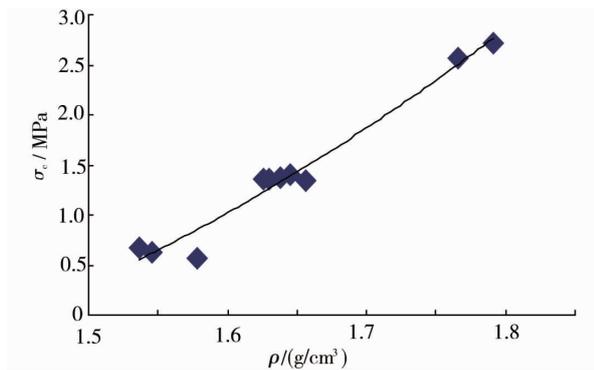


图5 试样强度与试样密度的关系

类岩石锚固体试样与无锚固体试样的密度 ρ 与纵波波速 V_p 进行比较,同样采用二阶多项式关系拟合,它们的相关系数为0.98,其拟合曲线如图6所示.其拟合公式为

$$V_p = -16.00\rho^2 - 51.09\rho + 40.01. \quad (6)$$

从图6可以看出,试样密度 ρ 对纵波波速 V_p 的影响较平缓.无松香试样密度的变化,对纵波波速影响较小,在1 374 ~ 1 458 m/s的范围波动.由于在试样中加入松香,导致密度降低,纵波波速也随之降低。

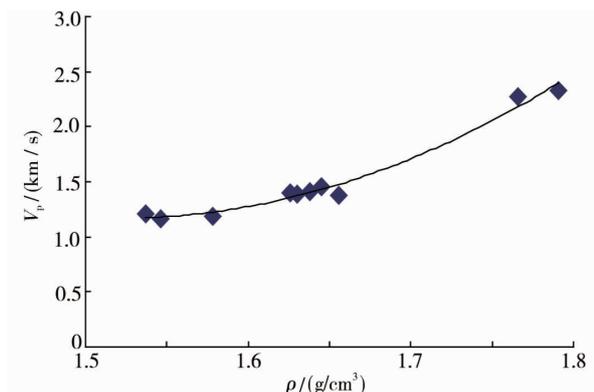


图6 试样密度与纵波波速的关系

4 结论

1) 无论标准试样有无锚固或相似原料配比变化,纵波波速 V_p 增大,单轴抗压强度 σ_c 也相应随着增大.加锚类岩石试样的单轴抗压强度比无锚固试样的强度有明显提高,对应的纵波波速也明显提高。

2) 类岩石锚固体试样的锚杆轴向布置和横向布置均能提高试样的抗压强度,但二者提高的幅度很相近,这可以通过2种加锚方向的试样纵波波速变化不大来反映。

3) 分别对比类岩石锚固体试样单轴抗压强度 σ_c 随试样密度 ρ 和纵波波速 V_p 的变化关系,纵波波速 V_p 的影响更显著.同时,试样密度 ρ 对纵波波速 V_p 的影响也较平缓。

4) 分析类岩锚固试样单轴抗压强度与弹性波的关系时,是可以通过纵波波速进行分析判断的,因此进行相关锚固模拟试验时,可以采取声波检测技术对试验过程校正检验,以正确估计试验误差.另外,类岩锚固试样双轴和三轴抗压强度与纵波波速关系需进一步研究。

参考文献:

- [1] 付宏渊,蒋中明,李怀玉,等.锚固岩体力学特性试验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2011,42(7):2095-2102.
- [2] 何国梁,吴刚,黄醒春,等.砂岩前后超声特性的试验研究[J].岩土力学,2007,28(4):779-785.
- [3] 樊秀峰,简文彬.砂岩疲劳特性的超声波速法试验研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(3):557-564.
- [4] 马荣田.岩体声波测试技术及其在巷道围岩岩体波速测试中的应用[J].铁道建筑,2006,(10):37-40.
- [5] 刘铁雄,隆威,胡丽乐.超声波在灰岩模拟材料强度测量中的应用[J].交通科学与工程,2013,29(1):27-31.
- [6] 李连贵,徐文胜,许迎年,等.岩爆模拟材料研制及模拟试验分析[J].华中科技大学学报,2001,29(6):80-82.
- [7] 韩素平,魏锦平,赵建忠,等.大尺度岩样单轴循环加载的力学特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(s1):4860-4865.
- [8] 南华,周英.相似模拟材料容重对强度的影响[J].矿业研究与开发,2005,27(3):12-13.