

类岩石加锚试样单轴压缩力学性质及破坏机制

曾泽民¹, 王斌^{1,2,3}, 曾国正¹, 陈仲之¹, 叶洲元¹, 杨蒙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:目前锚杆作用于完整岩体的锚固机制研究较少,以加松香的水泥砂浆和铜丝制成类岩石加锚试样,进行单轴压缩试验研究.与无锚试样相比,压缩试验的加锚类岩石单轴抗压强度明显提高,轴向锚固的弹性模量比横向锚固的弹性模量提高约48%,类岩石锚固体试样为剪切破坏或拉剪综合破坏,而无锚类岩石试样以劈裂张拉破坏为主.加锚类岩石抗拉强度有所提高,加锚试样压拉比大于无锚试样.类岩石加锚试样因锚杆锚固作用会形成等效围压,宏观上会提高围压与主压应力的比值,细观上使主裂纹产生挤压流动和塑性变形而不易形成拉伸翼裂纹,从而提高类岩石加锚试样的强度和改变类岩石加锚试样的破坏模式.

关键词:类岩石加锚试样;力学性质;单轴压缩;破坏机制

中图分类号:TD353.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2016)02-0021-06

Mechanical properties and failure mechanism of the rock-like anchored rock under the uniaxial compression load

ZENG Zemin¹, WANG Bin^{1,2,3}, ZENG Guozheng¹, CHEN Zhongzhi¹, YE Zhouyuan¹, YANG Meng¹

(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 anchorage mechanism of bolt to intact rock mass. The rock-like anchored specimens made of grouting mortar with rosin and copper wire have been researched by the uniaxial compression test. Compared with the specimens without bolt, compressive strength of the rock-like anchorage specimens in uniaxial compression test increase obviously, elasticity modulus with axial bolt is 48% higher than that with transverse bolt, and failure model of the specimens with bolt is shear failure or tensile-shear mixed failure, greatly different from the split tensile failure of those without bolt. Tensile strength of the rock-like anchorage specimens is also improved, and its ratio of compressive strength to tensile strength is higher than the specimens without bolt. The rock-like anchored specimens have the equivalent surrounding pressure caused by the anchorage of bolt, which can increase the ratio of surrounding pressure to main compressive stress from the macroscopic angle and cause the squeeze flow and plastic deformation of the main crack, and can prevent from forming tensile wing cracks in meso-scope. All of these can improve the strength of the rock-like anchorage body and change its failure mode.

Key words: rock-like anchored rock; mechanical properties; uniaxial compression; failure mechanism

收稿日期:2015-08-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41272304;51374105);中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金资助项目(SKLGDUK1214);湖南省科技厅资助项目(2013TP4057-2);湖南省大学生研究性学习和创新性实验计划资助项目(201310534001)

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: wangbinhnust@sina.com

锚杆支护作为一种解决地下巷道稳定问题的有效手段,其最突出的特点是通过置入岩体内部的锚杆来提高巷道围岩的稳定能力.锚杆对巷道围岩的作用,本质上属于三维应力问题,锚杆的力学特点及其锚固作用机理比较复杂,可以说至今还不能很好解释锚杆这种良好锚固效果^[1].目前通过室内相似试验来研究锚杆锚固作用机制的方法已经很普遍.DYSKIN^[2]采用透明树脂材料来模拟受压岩体;朱维申^[3]以砂-石膏和直径 3 mm 黄铜杆为原料,进行节理岩体开挖洞室系统锚杆锚固效应的相似模型试验;李术才^[4]选用改性橡胶粉-水泥砂浆和玻璃纤维增强塑料模拟岩石和锚杆,研究了单轴拉伸条件下单一锚杆对含贯穿裂隙岩体的加固效应;勾攀峰^[5]以含石膏的水泥砂浆和 15 A 保险丝制作类岩石锚固体,研究锚固体的峰值强度及残余强度;付宏渊^[6]以重晶石粉-石膏-石英砂和楠竹为原料,研究了系统锚杆加固后岩体的单轴压缩力学参数;杨建辉^[7]以石膏和直径 1.5 mm 铝丝为原料,对层状锚固顶板的全过程变形性质进行了相似研究.由上可以看出,目前的研究成果较多关注系统锚杆或单一锚杆对含裂隙、层理岩体的作用机制,但这对硬脆围岩的锚固岩体破坏特性的研究还不够全面.目前,硬岩巷道支护形式通常借鉴软岩巷道的支护方法,即以喷网锚为主的支护形式,尽管软岩锚杆支护理论对于硬脆围岩锚杆支护具有重要的借鉴意义,但应该看到,硬脆围岩支护原理与软岩巷道支护是截然不同的,硬岩巷道支护不允许硬岩进入塑性,因为硬岩进入塑性状态意味着丧失承载能力^[8],硬脆围岩巷道支护初期围岩完整性相对较好,尤其在布置锚杆之前会初喷混凝土封闭开挖面,喷砂可部分充填裂隙进一步维护硬岩的完整性,同时考虑到锚杆支护巷道破坏的渐进过程^[9],故锚杆锚固研究还应涉及对相对完整岩体的作用机制.目前锚杆作用于完整岩体的锚固机制研究较少,本文在借鉴前人成果的基础上,运用相似物理模拟方法,以加松香的水泥砂浆为类岩石材料,研究单轴压缩条件下完整岩体加锚后的力学特性和破坏机制.

1 类岩石加锚试样制作

1.1 现场围岩受力状态与加锚试样关系

巷道开挖后破坏原岩的应力平衡,围岩受力状态由三轴转变为单轴或双轴状态,并表现为切向应力 σ_θ .加载,待系统锚杆布置后巷道围岩应力状态应更接近单轴状态.锚杆的加固效果与锚杆的布置方向有关,巷道的两帮与顶板围岩为典型单轴应力区域,为分析问题的方便,选定锚杆分别沿试样横向中部和轴向中心布置以模拟这 2 区域围岩,同时加锚试样采用单筋布置锚杆,加锚试样方案如图 1 所示.

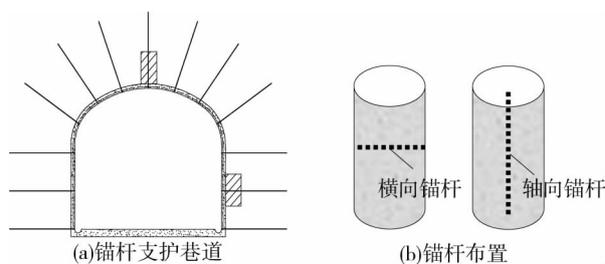


图 1 类岩石加锚试样方案

1.2 类岩石及锚杆相似材料选择

本试验以硬脆性岩石为配比对象,要求岩石相似材料具有脆性特征(张拉破坏为主)和较小的压拉强度比等,结合相关的文献的研究^[10],同时考虑方便后续大尺寸模型试件的制作,选取了市场上价格低廉的配比原料,主要包括 C325 标号水泥、建筑石膏、松香、湘江细河砂,按重量对各原料进行称量,配比比例为水泥:砂:水:石膏:松香=1:5.27:1:0.2:0.05,砂的粒径为 0.0~2.5 mm.

锚杆相似材料主要分为铜丝、铝丝等金属材料 and 楠竹、塑料杆等非金属材料 2 类,非金属材料多用于较大尺寸模型试件试验中,本试验试样为常规尺寸,故选取金属质的类锚杆相似材料.因要求其力学性能符合实际使用的锚杆性质,结合文献^[3]的研究,经对比实际普通强度锚杆杆体钢材力学性能^[11],确定选用直径 1.5 mm 的 H₅₉ 黄铜丝作为锚杆的相似材料.表 1 为黄铜丝的力学参数情况.

表 1 普通锚杆与黄铜丝的力学参数

材料	极限强度/MPa	直径/mm	延伸率/%
普通锚杆	240~400	16.0, 18.0, 20.0, 22.0, 24.0	16~25
黄铜丝	294	1.5	25

1.3 试样制作

本试验类岩石加锚试样的制作采用定制的铸铁三开模具,可制作高径比 1:1 和 2:1 的(50 mm 圆

柱体标准试样. 采用 TC - 100KA 型电子天平称量各配比原料, 混合后采用 JJ - 5 型水泥砂浆搅拌机充分搅拌, 将填料后的铸铁模具置于振幅 0.6 mm, 振频 2 860 次的振动台振捣实, 待成型后拆模, 经过 28 d 养护, 可制得符合要求的标准试样. 本试验需对比加锚和无锚的力学特性, 根据前述加锚试样方案, 类岩石加锚试样预置有 1 根经过压花处理的直径 1.5 mm 铜丝. 根据静态力学性能测试要求, 制得符合要求的高径比 2 : 1 和高径比 1 : 1 的 3 类试样, 并采用声波波速测试进行试样筛选. 图 2 为部分加锚试样及模拟锚杆用的压花铜丝.

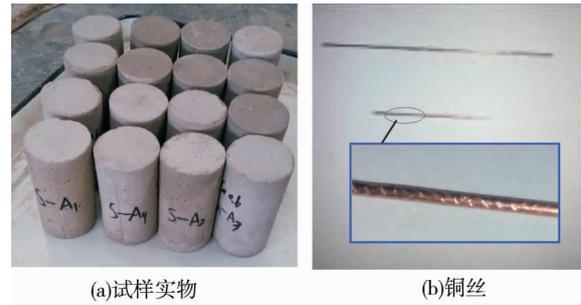


图2 类岩石锚固试样

2 单轴压缩试验结果及分析

2.1 试验设备

本试验设备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, 对高径比 2 : 1 的试样进行单轴压缩试验, 对高径比 1 : 1 的试样进行间接拉伸(巴西圆盘)试验. RMT - 150C 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. 试验的加载方式均采用沿竖向的位移加载, 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.

2.2 单轴压缩强度与变形特征

在 RMT - 150C 试验系统对类岩石无锚试样和锚固试样进行单轴压缩试验, 得到的 3 种工况试样的典型全应力 - 应变曲线, 如图 3 所示. 结合间接拉伸试验的抗拉强度, 得到 3 种工况试样的主要力学参数, 如表 2 所示. 由图 3 和表 2 可看出:

1) 加锚之后的类岩石抗压强度明显提高, 锚固方向改变对提高类岩石体强度的影响不大. 无锚类岩石的单轴抗压强度均值为 0.631 MPa, 锚固后的强度增大 1 倍, 锚杆横向布置和轴向布置的强度很接近, 均约为 1.36 MP.

2) 布置锚杆后的类岩石变形特征明显改善, 无锚类岩石的弹性模量均值为 0.084 GPa, 锚固后弹性模量强度增大近 4 倍. 锚杆的布置方向对类岩石的变形有影响, 轴向锚固的弹性模量比横向锚固的弹性模量提高约 48%, 文献[6]的研究亦表明轴向加锚对提高弹性模量明显优于横向加锚, 本试验与之结论一致. 另外, 锚固后的类岩石体的峰后塑性变形能力明显增强, 峰前曲线面积和峰后曲线面积比值称为弹性变形能指数, 无锚固类岩石的弹性变形能指数为 1.21, 锚固后的弹性变形能指数降低近 1 倍, 2 种锚杆布置方向的弹性变形能指数相差 15%.

3) 加锚之后的类岩石抗拉强度亦有所提高, 提高的幅度约为 70%, 横向和轴向加锚后的抗拉强度非常接近. 类岩石加锚试样的压拉比大于无锚类岩石, 锚杆可降低无锚类岩体的脆性.

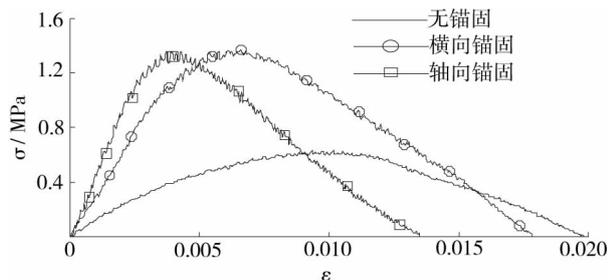


图3 类岩石锚固试样的单轴压缩应力 - 应变曲线

表2 类岩石锚固试样试验结果

锚固方式	单轴抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	弹性变形能指数	抗拉强度/MPa	压拉比
无锚固	0.631	0.048	1.21	0.040	15.7
轴向锚固	1.369	0.446	0.59	0.068	20.1
横向锚固	1.356	0.313	0.68	0.067	20.2

2.3 单轴压缩破坏特征

图 4 和图 5 分别为无锚类岩石和类岩石加锚试样的最终破坏情况. 由图 4 可以看出, 无锚类岩石试样

以劈裂张拉破坏为主,破坏裂隙基本平行于试样轴线,表现出典型的脆性破坏特征,这反映了前述相似材料的配比比例是能够满足对脆性岩石模拟的需要.由图 5 可以看出,类岩锚固体试样的破坏情况比较复杂,加锚试样的破坏情况与无锚试样是不同的,不再是单一的张拉破坏,无论横向锚固或轴向锚固,破坏裂面可出现规则破坏斜面,表现出典型的剪切破坏特征,或表现出张拉和张剪等综合破坏特征,破坏裂隙与试样轴线成水平、斜交等形态,这表明锚杆破坏了无锚类岩石的脆性特征.



图 4 无锚类岩石试样单轴压缩破坏情况



(a) 横向加锚;(b)轴向加锚

图 5 类岩石锚固试样单轴压缩破坏情况

3 类岩石加锚试样破坏机制分析

3.1 基于宏观受力状态的破坏机制

工程实际中,锚杆的承载机理是杆体与围岩通过化学粘结或机械咬合等载荷传递实现对围岩的锚固,锚固力就在锚杆与围岩相互作用过程中形成和变化.锚固力可分为托锚力、粘锚力、切向锚固力^[12],其值受杆体结构参数、锚固方式、岩体性质、围岩变形损伤的影响.本试验的类岩石锚固体因竖向载荷作用,初期受载变形产生的锚固力以粘锚力为主,后期随类岩体弱面滑移又会形成切向锚固力.图 6 为类岩石加锚试样单轴压缩受力状态,因不同的锚杆布置导致其锚固力分布有所不同,但都表现为限制围岩体的横向变形和扩容,考虑到锚杆锚固的压缩拱效应^[1],相应对锚杆的横向作用进行等效简化,锚杆的横向作用可等效为试样受侧围压 σ_3 的作用.

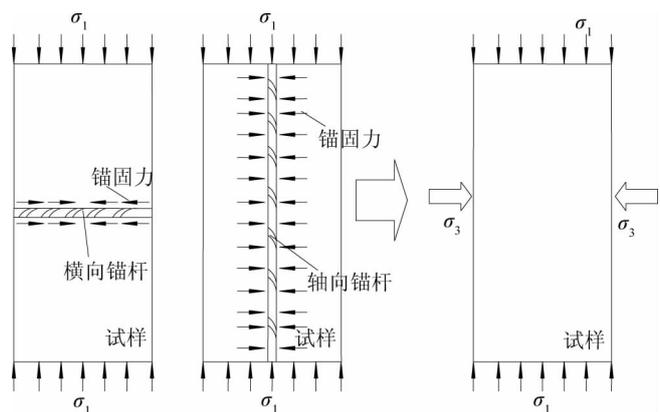


图 6 加锚试样单轴压缩宏观受力状态

对于图 6 加锚岩体的锚杆横向等效受力状态,假定优势破坏面遵循 Mohr - Coulomb 破坏准则,则存在如下关系

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) + 2c \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right). \tag{1}$$

式中, c : 岩石的内聚力; φ : 岩石的内摩擦角.

锚杆横向作用的等效侧围压 σ_3 使得加锚岩石内聚力变为 $c + \frac{\sigma_3}{2} \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right)$, 另外,锚杆的作用会

增加破坏面上法向应力,阻止岩石沿破坏面滑移,从而提高了加锚试样的破坏强度^[13].

文献[14]的研究表明,围压下混凝土为主的试样破坏状态主要取决于轴向主压应力 σ_1 与围压 σ_3 的比例,当 $\sigma_3/\sigma_1 \leq 0.1$ 时,表现为劈裂拉伸破坏, $\sigma_3/\sigma_1 \geq 0.2$ 时,表现为挤压流动破坏,而斜剪破坏介于二者之间.本试验的类岩石体的配比成分含有较多的砂浆成份,同时试样本身配比强度低,锚杆横向作用提供的等效侧围压 σ_3 可以满足在 $0.1\sigma_1$ 和 $0.2\sigma_1$ 之间,从而呈现前述试验的剪切破坏.

3.2 基于细观裂纹的破坏机制

宏观力学分析方法有其局限性,采用细观力学方法来分析岩石破裂演化过程及破坏规律的研究成果较多^[15].岩石从微观到宏观都存在大量裂隙,以水泥和细砂等相似材料制成的类岩石体亦是同样情况,这种带有微裂纹、孔隙等缺陷的材料,在荷载作用下往往在裂纹尖端产生应力集中,产生微裂纹扩展直至形成整个试样的破坏.类岩石材料宏观破裂的微力学过程实质也是微裂纹的萌生、扩展、相互影响和聚合过程.类岩石体中大量微裂纹服从一定的统计分布规律,其分析基础亦为单一微裂纹^[16],通常假设未开裂的初始存在的微裂纹为主裂纹,并且考虑为平面问题,其控制参数为裂纹半长 α 和裂纹倾角 β .图7给出单轴压缩无锚试样主裂纹的受力状态,主裂纹面的 τ_α 上会促使裂纹面滑动,在裂尖与主裂纹成 θ 角的方向,由于有拉应力 σ_θ 作用而引起I型裂纹扩展,形成拉伸翼裂纹.

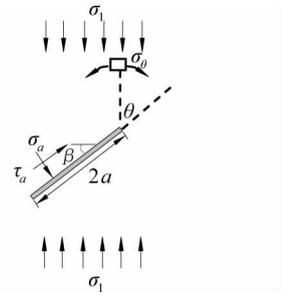


图7 主裂纹尖端应力场

以裂纹尖端 o 为坐标原点的极坐标系 (r, θ) ,无锚单轴压缩受力状态下的 σ_θ 可表示为^[16]

$$\sigma_\theta = \frac{3 \left[\frac{\sigma_1}{2} \sin 2\beta - f_s \left(\frac{\sigma_1}{2} + \frac{\sigma_1}{2} \cos 2\beta \right) - c_s \right] \sqrt{\pi \alpha}}{2 \sqrt{2\pi r}} \sin \theta \cos \frac{\theta}{2}. \quad (2)$$

式中, f_s :主裂纹面的摩擦系数; c_s :主裂纹面的粘结力.

研究表明^[17],翼裂纹将沿着 σ_θ 最大的方向扩展,由式(2),可得此时对应的 $\theta = 70.5^\circ$,翼裂纹扩展将最终偏向单轴压缩载荷方向,形成劈裂拉伸破坏,即如图4的破坏情况.

对于加锚试样,因为锚杆锚固作用形成了等效围压,试样将发生一定程度挤压流动和塑性变形,主裂纹不易形成拉伸翼裂纹.此时探讨加锚试样剪切破坏的原因,就不能再简单地利用断裂力学来讨论,需要借助于塑性力学方法或试验方法来进行研究^[14].

4 结论

1)单轴压缩试验的加锚类岩石抗压强度明显提高,变形特征明显改善;锚固方向改变对提高类岩石体强度的影响不大,对类岩石的变形有影响,轴向锚固的弹性模量比横向锚固的弹性模量提高约48%,锚固后类岩石的峰后塑性变形能力明显增强.类岩石加锚试样的压拉比大于无锚类岩石,可降低无锚类岩石的脆性.

2)不同于无锚类岩石试样单轴受压以劈裂张拉破坏为主,类岩石加锚试样则为剪切破坏或拉剪综合破坏.

3)类岩石加锚试样因锚杆锚固作用会形成等效围压,宏观上会提高围压与主压应力的比值,细观上使主裂纹产生挤压流动和塑性变形而不易形成拉伸翼裂纹,从而提高类岩石加锚试样的强度和改变类岩石加锚试样的破坏模式.

参考文献:

[1] 蔡美峰.岩石力学与工程[M].北京:科学出版社,2003.

- [2] Dyskin A V, Sahouryeh E, Jewell R J, et al. Influence of shape and locations of initial 3 - D cracks on their growth in uniaxial compression[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2003,70(15):2115 - 2136.
- [3] 朱维申,任伟中,张玉军,等. 开挖条件下节理围岩锚固效应的模型试验研究[J]. *岩土力学*,1997,18(1):1 - 7.
- [4] 李术才,张宁,吕爱钟,等. 单轴拉伸条件下断续节理岩体锚固效应试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*,2011,30(8):1579 - 1586.
- [5] 勾攀峰,侯朝炯. 锚固岩体强度强化的实验研究[J]. *重庆大学学报(自然科学版)*,2000,23(3):35 - 39.
- [6] 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 - 2101.
- [7] 杨建辉,夏建中. 层状岩石锚固体全过程变形性质的试验研究[J]. *煤炭学报*,2005,30(4):414 - 417.
- [8] 钱鸣高,石平五. *矿山压力与岩层控制*[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2010.
- [9] 王斌,李夕兵,马春德,等. 岩爆灾害控制的动静组合支护原理及初步应用[J]. *岩石力学与工程学报*,2014,33(6):1169 - 1179.
- [10] 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.
- [11] 何满潮. *中国煤矿锚杆支护理论与实践*[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [12] 陆士良. *锚杆锚固力与锚固技术*[M]. 北京:煤炭工业出版社,1998.
- [13] 朱训国,杨庆,栾茂田. 岩体锚固效应及锚杆的解析本构模型研究[J]. *岩土力学*,2007,28(3):527 - 532.
- [14] 王海龙,李庆斌. 围压下裂纹中自由水影响混凝土力学性能的机理[J]. *清华大学学报(自然科学版)*,2007,47(9):1443 - 1446.
- [15] 王斌,李夕兵. 单轴荷载下饱水岩石静态和动态抗压强度的细观力学分析[J]. *爆炸与冲击*,2012,32(4):423 - 431.
- [16] 周家文,徐卫亚. 单轴拉伸条件下脆性岩石微裂纹损伤模型研究[J]. *固体力学学报*,2009,30(5):509 - 514.
- [17] Horii H, Nemat - nasser S. Compression - induced micro - crack growth in brittle solids: axial splitting and shear failure[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1985,90(B4):3105 - 3125.