

真三轴压缩及卸载条件下充填体力学特性研究*

荆晓东¹, 宋泽普¹, 寇云鹏^{1,2}, 朱庚杰¹

(1. 山东黄金集团有限公司充填工程实验室, 山东 莱州市 261441;

2. 山东黄金集团有限公司, 山东 济南 250100)

摘要:对于采用充填采矿法的矿山, 充填体是井下采场的重要组成部分, 在先采矿房并充填完成后再回采矿柱的充填采矿工艺过程中, 充填体受原地应力及矿体开挖的扰动、卸载作用。基于充填开采工艺过程中的应力变化路径, 开展充填体真三轴压缩及卸载试验, 分析充填体失稳破坏过程及声发射响应特征, 研究充填体力学特性。结果表明: 真三轴压缩条件下充填体试件的破坏形式主要以拉伸破坏为主, 表现出更好的弹性, 峰值强度和弹性模量随养护时间的增加和围压的增大而增大; 单向卸载条件下, 充填体试件峰值强度较真三轴压缩条件下的峰值强度降低约 17.74%, 峰值强度随围压的增大而增大, 弹性模量随围压的增大而减小, 泊松比随围压的增大先增大后减小; 双向卸载条件下, 充填体试件快速失稳破坏, 峰值强度较真三轴压缩条件下的峰值强度降低约 17.76%, 充填体试件的峰值强度、弹性模量、泊松比均随围压的增大而增大; 充填体试件在双向卸载条件下比单向卸载条件下产生的变形更大, 破坏强度也更低。

关键词: 充填体; 力学特性; 真三轴压缩; 单向卸载; 双向卸载

中图分类号: TD853.34 **文献标识码:** A

文章编号: 1005-2763(2024)06-0056-09

0 引言

充填采矿法是保障矿山安全开采的重要采矿方法, 能够有效解决矿山开采引发的环境问题, 是实现绿色开采的关键技术, 在国内矿山得到了广泛的应用^[1-2]。膏体充填被广泛认为是矿山充填技术的发展趋势, 目前研究应用较多的充填工艺主要为分级粗尾砂或全尾砂充填, 对分级细尾砂充填的研究应用较少^[3-5]。

充填体是地下采场的重要组成部分, 对围岩起到重要的支护作用, 也是充填采矿法保证井下安全开采的关键, 在开采完成后充填体作为地下结构的

永久组成部分维持地压稳定^[6]。因此, 开展充填体力学特性研究对井下充填采场的安全稳定有重要意义, 有关学者对充填体力学特性开展了大量研究。夏雨等^[7]开展了不同骨料粒径分布胶结充填体的单轴压缩试验和声发射监测试验, 获得了粒径分布对充填体力学特性、声发射特征参数的影响规律及破坏特征。许茜等^[8]通过对粉煤灰-废石胶结充填体抗压、抗拉强度进行极差和方差分析, 得到 3 种因素对充填体抗压、抗拉强度的影响程度和显著性影响因素。谷中元等^[9]基于 RMT-150C 岩石力学试验系统对不同养护龄期下尾砂胶结充填体开展了单轴压缩试验。程爱平等^[10]开展了单轴压缩胶结充填体声发射(AE)监测试验, 获取了胶结充填体强度及声发射特征参数。龚函^[11]应用 SAEU2S 数字声发射系统和 RMT-150C 岩石试验机进行了充填体的单轴循环加卸载试验, 分析了充填体损伤与声发射特性。曹帅等^[12]对不同填充次数的胶结充填体进行了单轴试验, 定义了折减系数。孙琦等^[13]采用 TAW2000 型岩石三轴试验机对经过氯盐腐蚀后的膏体试件进行了蠕变试验, 建立了氯盐腐蚀条件下充填膏体的蠕变模型。赵奎等^[14]结合 FLAC 数值模拟软件对尾砂胶结充填体蠕变模型进行了二次开发。孙春东等^[15]采用自行研制的大尺寸蠕变试验系统和 FLAC3D 数值模拟软件对高水材料巷旁充填体进行了试验研究, 分析了高水材料充填体蠕变过程中瞬时、稳定及加速 3 个阶段位移和应力随时间的变化特征。王志国等^[16]设计了充填体围岩组合体模型, 采用红外辐射、场应变设备对双轴循环加卸载的组合体进行监测, 揭示了组合体模型表面的平均红外辐射温度(AIRT)及红外热像图随加卸载

* 收稿日期: 2023-11-01

基金项目: 山东省重大科技创新工程项目(2019SDZY05)。

作者简介: 荆晓东(1975—), 男, 山东莱州人, 工程师, 主要从事充填开采工艺及装备研究, E-mail: 289886085@qq.com。

通信作者: 宋泽普(1992—), 男, 贵州遵义人, 硕士, 主要从事充填开采工艺及装备研究, E-mail: szp1401531@163.com。

的变化规律。李宏亮等^[17]采用塌落度筒法抗压强度试验和 SEM 电镜扫描等,对不同因素交互作用下充填料浆塌落度、充填体力学特性及充填体微观形貌进行了研究。陈超等^[18]开展了不同传递路径、应变率下 SHPB 冲击试验,探讨了爆破扰动作用下充填矿柱的失稳破坏模式及动力学特性。王成^[19]研究了膏体充填体在不同渗透水压作用下的轴向应力-应变曲线,建立了不同渗透水压作用下膏体充填体的损伤本构模型,并分析了随机分布参数对模型的影响。上述研究主要采用单轴压缩、三轴压缩、剪切和抗拉试验等,并结合数值模拟、电镜扫描、声发射等技术手段分析了充填体力学特性,并对充填体蠕变、加卸载及多因素耦合等因素对充填体力学特性的影响进行了探讨。

充填开采中,矿房开采完毕并充填后,回采矿柱时,相邻的充填体处于三向静态载荷下,矿体开挖对充填体有卸载作用^[20-21]。针对这一问题,本文以分级细尾砂充填体为研究对象,开展真三轴压缩试验、单向及双向卸载试验,研究真三轴压缩及卸载条件下充填体力学特性,以期分级细尾砂充填技术的开发应用及井下充填工艺参数设计提供数据支撑。

1 试验材料与设备

1.1 充填体试件制备

充填骨料采用胶东地区某黄金矿山分级细尾砂,胶凝材料采用该矿山充填用胶凝材料。将分级细尾砂、胶凝材料和矿山充填用水混合制备成质量浓度为 64%、灰砂比为 1:4 的料浆并浇筑试件。试件按照国际岩石力学学会(IRSM)标准进行制备,形状为立方块,尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm,制作完成后的试件脱模后放入恒温(温度 (20 ± 1) ℃)、恒湿(湿度 (95 ± 1) %)的养护环境中养护。相应龄期充填体试件测试前,采用磨石机对试件表面进行研磨,使其表面光滑平整,满足真三轴试验样品平整度要求。

1.2 试验设备

本次试验采用真三轴水压致裂增透-润湿动态试验系统。该套系统在完成单轴、双轴及真三轴充填体力学试验的同时能够完成试验过程中的声发射监测。测试系统及试件的主要技术指标为:

- (1) 试件尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm;
- (2) 三向应力加载 ≥ 60 MPa,恒压、恒位移伺服加载;
- (3) 水力压裂 < 30 MPa,压力分辨率 > 0.5 kPa;

(4) 压力-变形监测应力分辨率为 0.5 kPa,试件变形测量范围为 0~20 mm,测量精度为 0.1%。

1.3 声发射检测

材料或结构受外力和内力作用产生变形或断裂,以弹性波形式释放出应变能的现象称为声发射(Acoustic Emission),简称 AE。声发射是一种常见的物理现象,通过建立声发射信号与材料变形特征之间的表征,可以对材料进行无损监测。本次试验采用 DS5 系列声发射数据采集分析系统,数据采集间隔时间为 0.1 s。

2 充填体真三轴压缩试验

2.1 试验方案

依据相同配比充填体试件单轴压缩强度测试结果,设计试验方案见表 1。试验前在充填体试件外侧涂抹凡士林,保证整个过程中垫块与充填体表面完全耦合, σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为最大主应力、中间主应力、最小主应力。

表 1 真三轴压缩试验方案

Table 1 Scheme of true triaxial compression experiment

试件编号	养护龄期/d	σ_1 /MPa	σ_2 /MPa	σ_3 /MPa
TTT-07-0.3	7	1 至破坏	0.3	0.5
TTT-07-0.5	7	1 至破坏	0.5	0.5
TTT-07-0.7	7	1 至破坏	0.7	0.5
TTT-28-0.3	28	1 至破坏	0.3	0.5
TTT-28-0.5	28	1 至破坏	0.5	0.5
TTT-28-0.7	28	1 至破坏	0.7	0.5
TTT-60-0.3	60	1 至破坏	0.3	0.5
TTT-60-0.5	60	1 至破坏	0.5	0.5
TTT-60-0.7	60	1 至破坏	0.7	0.5

试验加载采用位移控制和荷载控制两种方式,具体加载步骤为:

(1) 首先将三向压头以荷载控制方式(加载速率为 0.02 MPa/s)使试件端面与压头接触,并让试件达到压力平衡状态,此时 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$;

(2) 保持 σ_3 不变,继续以荷载控制方式(加载速率为 0.02 MPa/s)增加 σ_1 、 σ_2 至预设的初始应力状态;

(3) 保持 σ_2 、 σ_3 不变,以位移控制方式(加载速率为 0.05 mm/s)对试件施加最大主应力 σ_1 直至试件破坏,完成真三轴压缩试验全过程,通过充填体试件真三轴压缩试验获得常规压缩强度、变形参数及破坏特征。

2.2 试验结果及分析

真三轴压缩试验结果见表 2。

表 2 真三轴压缩试验结果

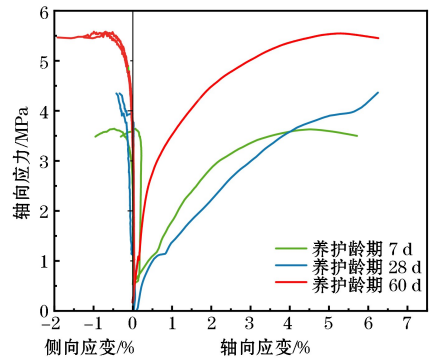
Table 2 Results of true triaxial compression experiment

试件编号	养护龄期/ d	围压/ MPa	峰值强度/ MPa	弹性模量/ MPa
TTT-07-0.3	7	0.3	3.63	79.39
TTT-07-0.5	7	0.5	4.42	126.71
TTT-07-0.7	7	0.7	5.20	162.71
TTT-28-0.3	28	0.3	4.36	83.49
TTT-28-0.5	28	0.5	4.80	175.70
TTT-28-0.7	28	0.7	6.02	180.75
TTT-60-0.3	60	0.3	5.55	116.62
TTT-60-0.5	60	0.5	6.34	128.61
TTT-60-0.7	60	0.7	6.71	278.88

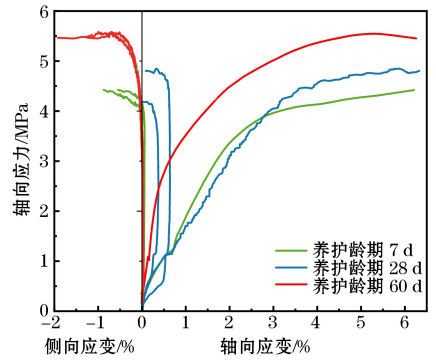
图 1 为不同加载条件下充填体试件应力-应变曲线,曲线在初期有一段轻微上凹,这是由于充填体试件内部空隙、孔隙被迅速挤压并压密的结果;之后曲线走势近似为一条直线,为弹性变形阶段;到达峰值强度后,曲线呈现出下降的特征,充填体试件产生破坏,承压能力急剧减弱并且变形量增大。随着养护时间的增加、围压的增大,充填体试件的峰值强度随之增大。围压的增加使充填体试件抗压性能显著增大,在一定程度上提高了充填体试件压缩变形各阶段的应变能,表现出更好的弹性。

图 2 为不同围压与充填体试件峰值强度的关系。由图 2 可以看出,随着围压的增加,充填体试件峰值强度呈现增大趋势。在不设置围压的情况下,充填体试件受压后,在其内部产生应力集中,导致微裂纹发育、扩展,直至贯通破坏;当设置围压后,压缩过程中,充填体试件受边界限制作用,其内部微裂隙或原始缺陷发育、扩展受限,表现出更好的抵抗破坏的性能。

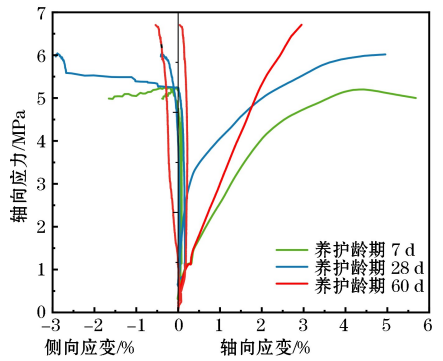
由表 2 数据可以看出,在相同的养护龄期条件下,充填体试件弹性模量随围压的增加呈逐渐增大的趋势;在相同围压条件下,充填体试件弹性模量随养护龄期的增加而增大。在三轴压缩初期,充填体试件内部原有结构面或微裂隙逐渐闭合,充填体试件被压密,早期非线性变形导致的充填体试件横向膨胀较小;弹性变形阶段,弹性模量随围压的增大而增大;当充填体试件达到弹性极限后,进入到非稳定破裂发展阶段,试件从体积压缩转为扩容,轴向应变和体积极变速率迅速增大,弹性模量出现下降。当围压为 0.7 MPa 时,充填体弹性模量下降速率较为平缓,结合图 1 可以看出,此时曲线没有明显的脆性特征,说明围压增大了充填体试件塑性延伸状态,从而导致了弹性模量的较平缓下降现象。



(a) TTT-0.3



(b) TTT-0.5



(c) TTT-0.7

图 1 不同加载条件下充填体试件应力-应变曲线

Fig.1 Complete stress-strain curves of backfilling specimens under different loading conditions

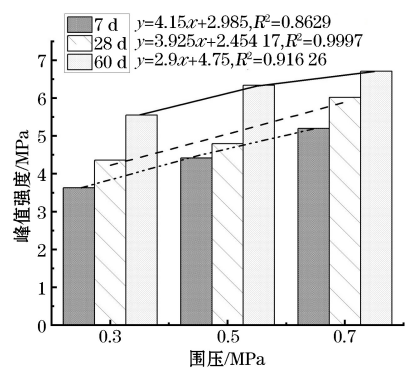


图 2 不同围压与充填体试件峰值强度关系

Fig.2 Relationship between different confining pressures and the peak strength of backfilling specimens

图3为TTT-07-0.7充填体试件压缩破坏过程中受载荷时间-振铃能量-累积振铃能量关系图。分析图3可知,与岩石等脆性材料不同,胶结充填体在形成后本身孔隙结构较多,充填体试件在三轴压缩过程中,声发射振铃能量随加载时间主要表现为4个阶段:初始活跃期、初次平静期、峰前活跃期和峰后平静期。在初始活跃期,充填体试件在压力作用下主要表现为孔隙压密,充填体表面和内部孔隙结构压密状态同时表征,声发射振铃能量信号表现为集中杂乱式分布;在初次平静期,对应充填体试件弹性变形阶段,声发射振铃能量呈现零星分布,仅局部有初始裂隙压密,且对应数值较小,声发射振铃能量信号微弱无序;在峰前活跃期,声发射振铃能量信号活跃程度增加一倍,此时对应充填体试件屈服破坏阶段,在初始平静期积聚的能量开始释放;在峰后平静期,内部裂隙大量扩展,充填体试件承载能力大幅降低。

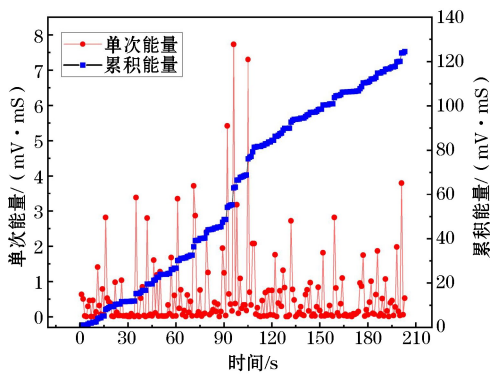


图3 TTT-07-0.7 充填体试件声发射特征

Fig.3 Acoustic emission characteristics of backfilling specimen TTT-07-0.7

充填体是一种人工制造且各向异性的材料,其破坏方式受时间、温度、载荷方式等多种因素的影响。图4为养护龄期7d充填体试件在不同围压条件下的破坏状态,充填体试件的破坏形式主要以拉伸破坏为主。围压为0.3 MPa时,裂纹主要是轻微向内倾斜或平行于加载方向扩展,达到峰值应力后在表面形成连续的裂纹,裂纹未贯穿充填体试件,充填体试件较完整;围压为0.5 MPa时,充填体试件产生明显的塑性变形,拉伸裂纹扩展到试件两个表面并产生明显的径向膨胀,这是由于产生了泊松效应,最终导致充填体试件整体破坏;围压为0.7 MPa时,部分拉伸裂纹以一定角度连续转化为拉剪裂纹,

整体破坏模式为“Y”形共轭剪切破坏。围压的存在抑制了充填体试件的泊松效应,减少了拉裂纹的产生发育,从而提高了充填体试件的强度和弹性模量。

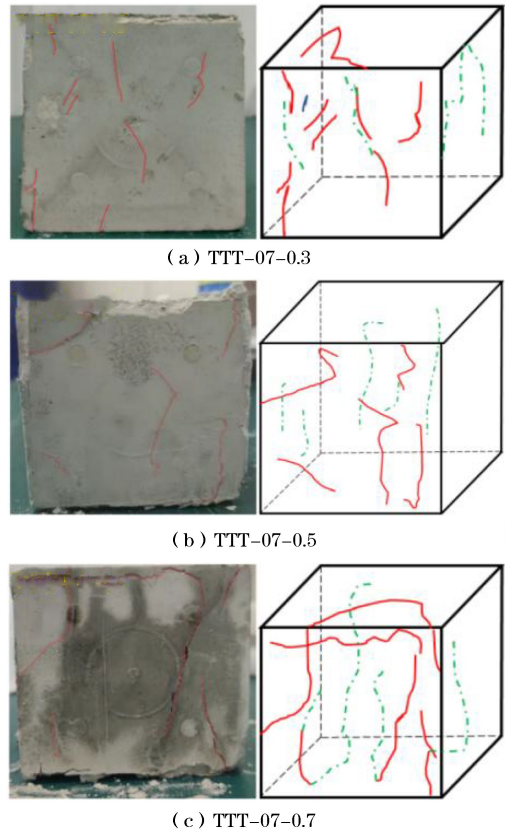


图4 充填体试件破坏状态

Fig.4 Failure state of backfilling specimen

3 单向及双向卸载条件下充填体力学特性研究

3.1 试验方案

基于井下矿体开挖应力路径变化,结合第2节充填体真三轴压缩试验结果,设计单向及双向卸载试验方案见表3。

表3 单向及双向卸载试验方案

Table 3 Experiment schemes for unidirectional and bidirectional unloading

试验类型	试件编号	养护龄期/d	σ_1 /MPa	σ_2 /MPa	σ_3 /MPa
单向卸载试验	DXH-0.3	60	峰值的80%	0.3~0	0.5
	DXH-0.5		峰值的80%	0.5~0	0.5
	DXH-0.7		峰值的80%	0.7~0	0.5
双向卸载试验	SXH-0.3-0.5	60	峰值的80%	0.3~0	0.5~0
	SXH-0.5-0.5		峰值的80%	0.5~0	0.5~0
	SXH-0.7-0.5		峰值的80%	0.7~0	0.5~0

试验中设定充填体真三轴压缩试验系统 Z 方向为最大主应力方向(σ_1), Y 方向为中间主应力方向(σ_2), X 方向为最小主应力方向(σ_3), 采用位移和载荷两种控制方式, 具体试验步骤如下:

(1) 以位移控制方式(加载速率为 0.05 mm/s)将设备与试件接触;

(2) 根据试验方案(见表 3), 以位移控制方式(加载速率为 0.05 mm/s)将 σ_2 和 σ_3 加载至设计值;

(3) 依据充填体试件真三轴压缩试验结果(见表 2), 以位移控制方式(加载速率为 0.05 mm/s)对试件施加轴向应力 σ_1 ;

(4) 以载荷控制方式(卸载速率为 2 kPa/s)卸载侧向载荷(σ_2 、 σ_3)直至充填体试件破坏, 并拍摄记录充填体破坏后的形态。

3.2 单向卸载条件下充填体力学特性分析

充填体试件单向卸载试验结果见表 4, 从表 4 数据可以看出, 单向卸载时, 充填体试件的峰值强度随围压的增大而增大, 弹性模量随围压的增大而减小, 泊松比随围压的增大先增大后减小。对比真三轴压缩试验结果(见表 2), 单向卸载条件下充填体试件的峰值强度较真三轴压缩条件下的峰值强度降低约 17.74%。

表 4 充填体试件单向卸载试验结果

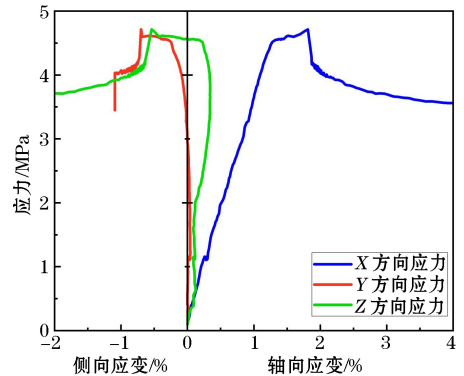
Table 4 Experimental results of unidirectional unloading of backfilling specimens

试件编号	峰值强度/MPa	弹性模量/MPa	泊松比
DXH-0.3	4.61	802.33	0.20
DXH-0.5	5.22	722.10	0.41
DXH-0.7	5.46	336.97	0.05

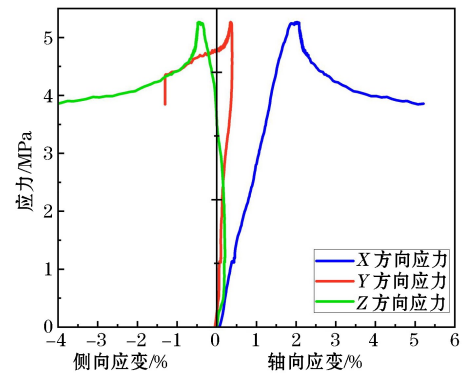
图 5 为充填体试件在单向卸载时的应力-应变曲线。从图 5 可以看出, 充填体试件的变形破坏均经历了内部孔隙压密阶段、线弹性变形阶段、屈服阶段和卸载承压阶段。

图 6 为 DXH-0.7 充填体试件破坏及声发射特征, 充填体试件在单向卸载条件下声发射活动规律与三轴压缩条件下声发射活动规律呈现相似的特征, 但声发射信号强度有显著提高, 各个阶段的峰值分布更加集中, 表明充填体试件在单向卸载条件下破碎更充分、更迅速, 承压性能得到充分释放的同时快速降低。

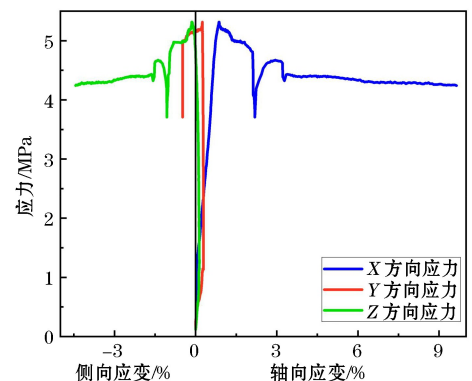
围压越大, 充填体试件的峰值强度越高, 线弹性变形阶段能够延至更高水平, 且残余应力也越大。原因是围压的存在使充填体试件内部结构更加致密, 同时约束了充填体试件的径向变形, 使充填体试件内部微裂隙扩展, 不会造成充填体承载能力的大幅降低。裂纹不断扩展直至充填体试件表面产生裂隙, 才会引起充填体破坏, 在宏观上表现为充填体具有更高的承载能力。



(a) DXH-0.3

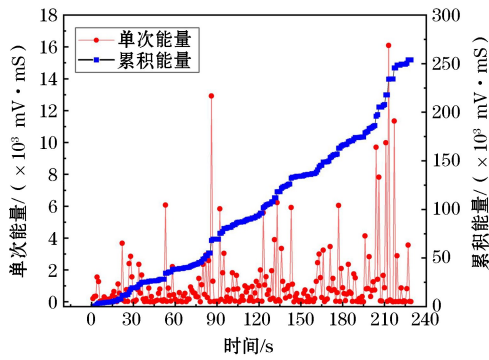


(b) DXH-0.5

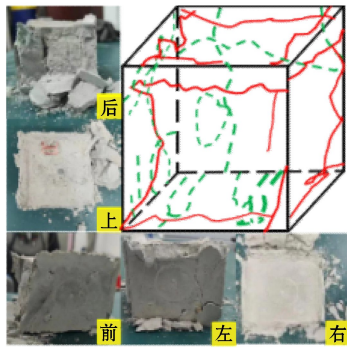


(c) DXH-0.7

图 5 单向卸载条件下充填体试件应力-应变曲线
Fig.5 Stress-strain curves of backfilling specimen under unidirectional unloading conditions



(a) 声发射特征



(b) 试件破坏状态

图 6 DXH-0.7 充填体试件声发射特征及破坏状态

Fig.6 Acoustic emission characteristics and failure state of backfilling specimen DXH-0.7

3.3 双向卸载条件下充填体力学特性分析

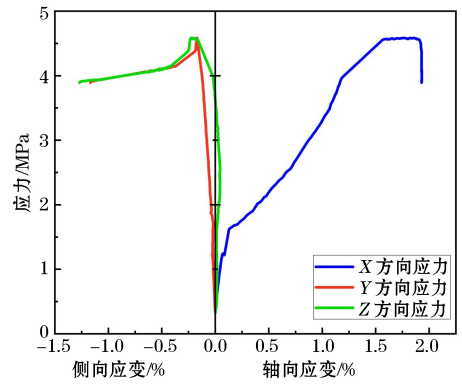
充填体试件双向卸载试验结果见表 5,从表 5 数据可以看出,双向卸载时,充填体试件的峰值强度、弹性模量、泊松比均随围压的增大而增大。对比真三轴压缩试验结果(见表 2),双向卸载条件下充填体试件的峰值强度较真三轴压缩条件下的峰值强度降低约 17.76%。

表 5 充填体试件双向卸载试验结果

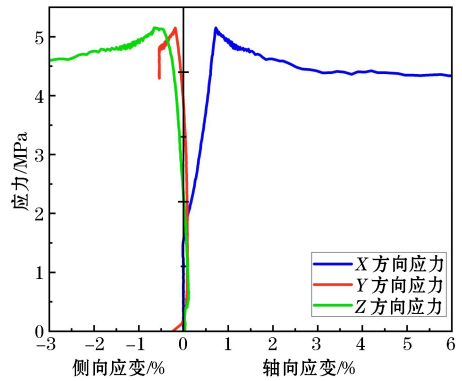
Table 5 Experimental results of bidirectional unloading of backfilling specimens

试件编号	峰值强度/MPa	弹性模量/MPa	泊松比
SXH-0.3-0.5	4.61	231.49	0.02
SXH-0.5-0.5	5.17	567.50	0.08
SXH-0.7-0.5	5.51	454.65	0.48

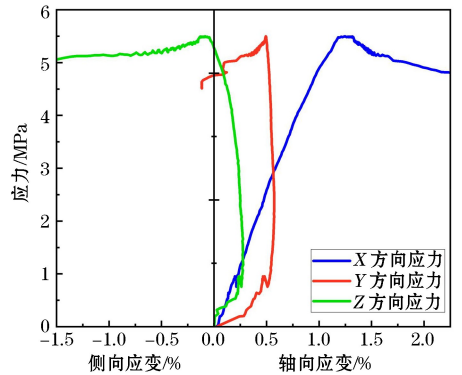
图 7 为充填体试件在双向卸载时的应力-应变曲线,分析曲线特征,充填体试件的变形破坏同样可分为内部孔隙压密阶段、线弹性变形阶段、屈服阶段和卸载承压阶段。



(a) SXH-0.3-0.5



(b) SXH-0.5-0.5



(c) SXH-0.7-0.5

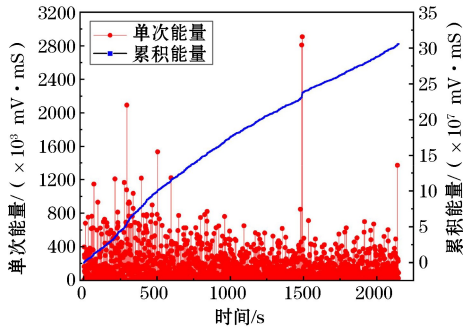
图 7 双向卸载条件下充填体试件应力-应变曲线

Fig.7 Stress-strain curves of backfilling specimens under bidirectional unloading conditions

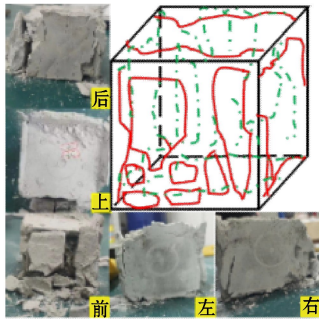
图 8 为 SXH-0.7-0.5 充填体试件破坏及声发射特征,充填体试件在双向卸载条件下声发射活动异常活跃,表明充填体试件在双向卸载条件下快速失稳破坏。

当围压从 0.3 MPa 开始卸载时,充填体试件各边界面会出现网状裂纹,部分表面出现了多条较长的拉裂纹,其主要原因是卸载造成应力严重失衡,微

单元间的变形趋向各异且幅度较大,在相对薄弱的位置会出现较大的损伤。在 0.3 MPa 围压条件下卸载效果不太明显,试件的破坏不严重,但可以观察到试件的端部出现破坏,这是由于端部应力集中而引起的;当围压从 0.5 MPa 开始卸载时,试件的破碎更充分,产生多个小块并伴随有大块剥落,裂纹的尺寸明显加大;当围压从 0.7 MPa 开始卸载时,试件的破坏表现为大块剥落伴随有部分碎渣存在,此时充填体已失去了承压能力。



(a) 声发射特征



(b) 试件破坏状态

图 8 SXH-0.7-0.5 充填体试件声发射特征及破坏状态
Fig.8 Acoustic emission characteristics and failure state of backfilling specimen SXH-0.7-0.5

4 结论

(1) 真三轴压缩试验结果表明,充填体试件的破坏形式主要以拉伸破坏为主,应力-应变曲线没有明显的脆性特征,围压强化了充填体弹性模量,增大了塑性延伸状态,表现出更好的弹性。随着养护时间的增加、围压的增大,充填体试件的峰值强度随之增大。在相同的养护龄期条件下,充填体试件弹性模量随围压的增加呈逐渐增大的趋势;在相同围压条件下,充填体试件弹性模量随养护龄期的增加而增大。

(2) 单向卸载条件下,充填体试件破碎更充分、

更迅速,承压性能得到充分释放的同时应力快速降低,峰值强度较真三轴压缩条件下的峰值强度降低约 17.74%。峰值强度随围压的增大而增大,弹性模量随围压的增大而减小,泊松比随围压的增大先增大后减小。

(3) 双向卸载条件下,充填体试件快速失稳破坏,峰值强度较真三轴压缩条件下的峰值强度降低约 17.76%。充填体试件的峰值强度、弹性模量、泊松比均随围压的增大而增大。

(4) 卸载方式不同,导致充填体试件的变形破坏特征也不同,充填体试件在双向卸载条件下比单向卸载条件下产生的变形更大,破坏强度也更低。

参考文献(References):

- [1] 王勇,吴爱祥,杨军,等.深部金属矿开采关键理论技术进展与展望[J].工程科学学报,2023,45(8):1281-1292.
WANG Yong, WU Aixiang, YANG Jun, et al. Progress and prospective of the mining key technology for deep metal mines[J]. Chinese Journal of Engineering, 2023, 45(8): 1281-1292.
- [2] 吴爱祥,王勇,王洪江.膏体充填技术现状及趋势[J].金属矿山,2016(7):1-9.
WU Aixiang, WANG Yong, WANG Hongjiang. Status and prospects of the paste backfill technology[J]. Metal Mine, 2016(7):1-9.
- [3] 宋泽普,付有,林顺才,等.分级细尾砂充填试验研究[J].矿业研究与开发,2022,42(11):29-33.
SONG Zepu, FU You, LIN Shuncai, et al. Experimental study on classified fine tailings backfilling [J]. Mining Research and Development, 2022, 42(11): 29-33.
- [4] 张连富,王洪江,吴爱祥,等.颗粒粒径对尾砂膏体触变性的影响[J].工程科学学报,2023,45(1):1-8.
ZHANG Lianfu, WANG Hongjiang, WU Aixiang, et al. Study of the effect of particle size on the thixotropy of tailings pastes[J]. Chinese Journal of Engineering, 2023, 45(1):1-8.
- [5] 寇云鹏,韩冲冲,齐兆军,等.分级细尾砂胶结充填体长期力学特征研究[J].矿业研究与开发,2023,43(2):43-49.
KOU Yunpeng, HAN Chongchong, QI Zhaojun, et al. Study on long-term mechanical characteristics of cemented backfill with graded fine tailings[J]. Mining Research and Development, 2023, 43(2): 43-49.
- [6] 谭玉叶,余昕,宋卫东,等.充填体与围岩组合承压作用机理试验研究[J].采矿与安全工程学报,2018,35(5):1071-1076.
TAN Yuye, YU Xin, SONG Weidong, et al. Experimental study on combined pressure-bearing mechanism of filling body and surrounding rock[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(5):1071-1076.
- [7] 夏雨,卢爱红.连续级配高强胶结充填体力学特性及破坏特征分析[J].采矿与岩层控制工程学报,2023,5(1):55-66.

- XIA Yu, LU Aihong. Analysis of the mechanical properties and damage characteristics of continuously graded high-strength cemented backfill[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2023, 5(1): 55-66.
- [8] 许茜,王彦明,张雯超.基于正交试验的充填体力学及微观特性研究[J].采矿与岩层控制工程学报,2022,4(6):90-98.
- XU Qian, WANG Yanming, ZHANG Wenchao. Mechanical performances and microscopic properties of cemented backfilling based on orthogonal experiment[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2022, 4(6): 90-98.
- [9] 谷中元,秦宏宇,于灯凯.养护龄期对充填体力学性能及损伤特性的影响[J].矿业研究与开发,2020,40(10):85-92.
- GU Zhongyuan, QIN Hongyu, YU Dengkai. Effect of curing age on mechanical properties and damage law of backfill[J]. Mining Research and Development, 2020, 40(10): 85-92.
- [10] 程爱平,董福松,舒鹏飞,等.连续级配胶结充填体力学特性及声发射特征[J].华中科技大学学报(自然科学版),2021,49(8):46-52.
- CHENG Aiping, DONG Fusong, SHU Pengfei, et al. Mechanical properties and acoustic emission characteristics of continuous graded cemented backfill [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 49(8): 46-52.
- [11] 龚隼.循环加卸载条件下充填体损伤与声发射特性研究[D].赣州:江西理工大学,2011.
- GONG Cong. Research on damage and acoustic emission characteristics of filling materials under cyclic loading and unloading conditions [D]. Gan Zhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2011.
- [12] 曹帅,宋卫东,薛改利,等.考虑分层特性的尾砂胶结充填体强度折减实验研究[J].岩土力学,2015,36(10):2869-2876.
- CAO Shuai, SONG Weidong, XUE Gaili, et al. Experimental study on strength reduction of tailings cemented fill considering layering characteristics [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(10): 2869-2876.
- [13] 孙琦,李喜林,卫星,等.氯盐腐蚀对充填膏体蠕变特性影响的试验研究[J].实验力学,2015,30(2):231-238.
- SUN Qi, LI Xilin, WEI Xing, et al. Experimental study of the influence of chloride corrosion on creep properties of filling paste [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2015, 30(2): 231-238.
- [14] 赵奎,何文,熊良宵,等.尾砂胶结充填体蠕变模型及在FLAC3D二次开发中的实验研究[J].岩土力学,2012,33(增刊1):112-116.
- ZHAO Kui, HE Wen, XIONG Liangxiao, et al. Testing study of creep model for tailing cemented backfill and its secondary development based on FLAC3D[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(S1): 112-116.
- [15] 孙春东,张东升,王旭锋,等.大尺寸高水材料巷旁充填体蠕变特性试验研究[J].采矿与安全工程学报,2012,29(4):487-491.
- SUN Chundong, ZHANG Dongsheng, WANG Xufeng, et al. Large-size test on creep characteristics of high water material for filling body beside roadway [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(4): 487-491.
- [16] 王志国,王瑞,李跃龙.循环加卸载充填体围岩组合体红外辐射特征[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2023,42(3):257-265.
- WANG Zhiguo, WANG Rui, LI Yuelong. Infrared characteristics of combination of surrounding rock and backfilling body under cyclic loading and unloading [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2023, 42(3): 257-265.
- [17] 李宏亮,李树建,李金鑫,等.不同因素交互作用下胶结充填体力学特性试验研究[J].矿业研究与开发,2023,43(6):51-56.
- LI Hongliang, LI Shujian, LI Jinxin, et al. Experimental study on the mechanical properties of cemented backfill under the interaction of different factors [J]. Mining Research and Development, 2023, 43(6): 51-56.
- [18] 陈超,杨志彬,马姣阳,等.一维动静组合加载下多角度耦合充填体力学特性研究[J].金属矿山,2021(9):18-26.
- CHEN Chao, YANG Zhibin, MA Jiaoyang, et al. Study on the mechanical properties of multi-angle coupled backfill under one-dimensional dynamic and static combined loading [J]. Metal Mine, 2021(9): 18-26.
- [19] 王成.渗流作用下膏体充填体力学性能演变及损伤机制[D].赣州:江西理工大学,2021.
- WANG Cheng. Evolution of mechanical properties and damage mechanism of paste filling under seepage [D]. Gan Zhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2021.
- [20] 付建新,宋卫东,谭玉叶.复杂加卸载路径下闪长玢岩强度特征及声发射特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(增刊2):3858-3867.
- FU Jianxin, SONG Weidong, TAN Yuye. Experimental study of the characteristics of strength and AE of diorite porphyrite under complex loading and unloading path [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(S2): 3858-3867.
- [21] 张爱卿,李金云,吴爱祥,等.嗣后充填多矿柱同时回采充填体侧向位移研究[J].矿冶工程,2022,42(2):24-27+31.
- ZHANG Aiqing, LI Jinyun, WU Aixiang, et al. Lateral displacement of backfill body in multiple pillars extraction after cut and fill mining [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022, 42(2): 24-27+31.

Mechanical Characteristics of Backfill Under True Triaxial Compression and Unloading Conditions

JING Xiaodong¹, SONG Zepu¹, KOU Yunpeng^{1,2}, ZHU Gengjie¹

(1, Filling Engineering Laboratory, Shandong Gold Group Co., Ltd., Laizhou, Shandong 261441, China;

2, Shandong Gold Group Co., Ltd., Jinan, Shandong 250100, China)

Abstract: For mines that adopt the filling mining method, the backfill is an important component of the underground stope. During the filling mining process of the first mining room and the pillars to be extracted after filling is completed, the backfill is disturbed and unloaded by the original geological stress and the excavation of the ore body. Based on the stress variation path during the filling mining process, the true triaxial compression and unloading experiments on backfill were carried out, the instability failure process and acoustic emission response characteristics of backfill were analyzed, and the mechanical properties of backfill were studied. The results are concluded as follows. Firstly, under true triaxial compression conditions, the failure mode of the backfill specimens is mainly tensile failure, exhibiting better elasticity. The peak strength and elastic modulus increase with the increase of curing time and confining pressure. Secondly, under unidirectional unloading conditions, the peak strength of the backfill specimens decreases by about 17.74% compared to the peak strength under true triaxial compression conditions. The peak strength increases with the increase of confining pressure, the elastic modulus decreases with the increase of confining pressure, and the Poisson's ratio firstly increases and then decreases with the increase of confining pressure. Thirdly, under bidirectional unloading conditions, the backfill specimens rapidly lose stability and fail, with a peak strength decrease of about 17.76% compared to the peak strength under true triaxial compression conditions. The peak strength, elastic modulus, and Poisson's ratio of the backfill specimens all increase with the increase of confining pressure. Finally, the backfill specimens undergo greater deformation and lower failure strength under bidirectional unloading conditions than under unidirectional unloading conditions.

Key words: Backfill, Mechanical characteristics, True triaxial compression, Unidirectional unloading, Bidirectional unloading