



冲击加载下尾砂胶结充填体力学行为及 变形破坏特征

杨世兴^{1,2}, 王洪江^{1,2}, 侯永强^{1,2}, 张敏哲^{1,2}

(1. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083;
2. 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要: 为了研究不同养护龄期的分级尾砂胶结充填体在中等应变率动态冲击加载下的动力学特性, 采用分离式霍普金森杆(SHPB)试验技术对16组48个充填体试样进行单次冲击实验。结果表明: 充填体动态抗压强度和动态抗压强度提高因子随平均应变率的增大呈线性增长规律, 而随养护龄期的延长, 应变率敏感性呈减小趋势, 动态抗压强度增幅则与冲击速度呈负相关; 充填体的韧性指数随平均应变率的增加呈指数函数增长, 且养护早期应变率敏感性更高、增幅更显著; 充填体的吸收能、单位体积应变能(比能量吸收)与应变率、养护龄期均具有显著正相关性, 且养护早期的能量值应变率敏感性更高、增幅更明显; 动态冲击加载下, 破坏形态主要为轴向拉伸破坏, 且平均应变率越大、养护龄期越短, 破坏越显著。

关键词: 充填体; 应变率; 养护龄期; 动态强度; 单位体积吸收能; 破坏形态

文章编号: 1004-0609(2022)-03-0908-12

中图分类号: TD835

文献标志码: A

引文格式: 杨世兴, 王洪江, 侯永强, 等. 冲击加载下尾砂胶结充填体力学行为及变形破坏特征[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(3): 908-919. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2022-37839

YANG Shi-xing, WANG Hong-jiang, HOU Yong-qiang, et al. Mechanical behavior and deformation failure characteristics of cemented tailings backfill under impact loading[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(3): 908-919. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2022-37839

在目前浅部资源开采日渐枯竭的背景下, 国内外众多矿山已经逐渐转入深井开采, 而深井开采条件极为复杂。充填采矿法具有降低矿石贫化率、有效控制采场地压、降低岩爆发生频率等众多优点。由于充填采矿法能够为工作人员提供一个较为安全的工作环境, 使得充填采矿法已经成为当下深井矿产资源回采的主流采矿方法^[1-3]。对于充填采矿法而言, 最为关键的要素为充填体的力学性能; 若充填体力学性能较差, 则在矿体回采过程中充填体可能发生变形破坏, 不能起到良好的支撑围岩作用, 容易导致事故的发生。因此, 准确掌握充填体在采

场内的力学行为及确保充填体具有良好的力学强度是充填采矿法最为关键之处^[4-5]。

充填体一般由选厂尾砂、胶凝材料及水按照一定比例混合而成, 属于典型的多相复合材料, 其内部蕴含着微裂隙、微孔隙、气泡等缺陷, 具有明显的损伤特性^[6]。此外, 相比于地表堆存的尾矿, 地下空间围岩所处环境复杂, 如受高地应力、强烈的开采扰动等因素的影响。因此, 置于地下空间的尾砂胶结充填体应具备良好的强度及力学性质, 才能保证邻近采场及矿柱的安全^[7]。目前, 国内外众多学者针对尾砂胶结充填体力学特性开展了众多的研

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0602903, 2018YFC0603705); 国家自然科学基金资助项目(51834401)

收稿日期: 2020-11-09; 修订日期: 2021-05-06

通信作者: 王洪江, 教授, 博士; 电话: 15901196527; E-mail: wanghj1988@126.com

究, 刘志祥等^[8-9]详细研究了不同水泥含量下的充填体损伤特性, 并基于能量守恒原则探讨了充填体与采场围岩的合理匹配; 聂亚林等^[10]详细分析了含水率对尾砂胶结充填体力学性能的影响规律, 并建立了考虑含水率的损伤本构模型; 赵康等^[11]对钽铌矿尾砂胶结充填体的力学性能开展了详细的研究, 揭示了质量浓度对充填体力学性能及损伤特性的影响规律; 曹帅等^[12]揭示了在单轴加载下结构特性对尾砂胶结充填体抗压强度、变形破坏特征的影响规律。可以看出, 国内众多学者对尾砂胶结充填体的力学性能进行了较为详细的研究, 所获成果极大推动了矿山充填的发展。

然而, 在矿山井下实际开采中, 充填体不仅受到静态载荷的影响, 而且还须承受变化较快的动态载荷, 如井下大规模开采爆破等。大量研究表明: 应变率能够对材料的力学性能产生显著的影响, 诸如混凝土、岩石及煤岩体等脆性材料在动态加载下往往能够表现出更强的承载能力, 这种现象称为材料动态破坏强度的应变速率效应^[13]。因此, 有必要针对高应变率下充填体力学性能开展相应的研究。目前, 在尾砂胶结充填体的动态力学性能研究方面, 国内众多学者对于充填体的动态力学性能也进行了较为详细的研究。例如, 李雪珍^[14]、余姚^[15]分析了掺入早强剂和膨润土对充填体动态力学特性的影响; 侯永强等^[16]分析了干燥及饱水状态下充填体的动载破坏特性; 王俊程等^[17]分析了不同配比下充填体破坏规律和能量变化; 张云海等^[18]研究了分层充填体的动态力学性能; 杨伟等^[19]分析了在冲击加载下, 灰砂比和质量浓度对充填体动态力学性能的影响规律; 朱鹏瑞等^[20]针对充填体在冲击荷载下的力学性能及变形破坏特征开展了相应的研究。然而, 对于充填体力学性能而言, 养护龄期也是一个至关重要的因素, 充填体的力学性能在不同的养护龄期内通常表现出较大的差异性。目前, 关于不同养护龄期内的充填体动态力学性能及冲击变形破坏特征的研究鲜有报道, 若能系统了解冲击荷载下不同养护龄期内充填体的力学特性及变形破坏特征, 则可对爆破工序中如何采取措施来防护充填体结构提出相应的指导。

针对上述情况, 笔者在前人研究的基础上, 利用分离式霍普金森杆试验系统对不同养护龄期内的分级尾砂胶结充填体的力学性能及变形破坏特征开

展相应的研究, 揭示出在中等应变率下, 养护龄期对充填体动态力学性能及变形破坏特征的影响规律。本研究结果对于准确掌握不同养护龄期内充填体动态力学性能和确保井下矿体的安全回采具有重要的理论意义和工程价值。

1 实验

1.1 试验材料及试样制作

试验采用的胶凝材料为普通硅酸盐水泥, 充填骨料为某矿山分级尾砂。根据该矿山常用的充填配比参数, 充填体试样主要配置灰砂质量比为 1:6、质量浓度为 72%, 养护龄期分别为 3、7、14 及 28 d。按照国际岩石力学学会 ISRM 推荐的试验试件选择方法^[21], 本次试验充填体试样为圆柱体。动载冲击试件直径 50 mm、高度 50 mm; 单轴压缩试件直径 50 mm、高度 100 mm, 试样制作流程按照国际岩石力学试验规范以及工程岩体试验标准(GB/T 50266—99)进行。

试样制作前, 先将尾砂放入烘干箱进行处理, 选用电子秤(精度为 0.01 g)称取分尾砂和水泥, 量筒量取自来水, 按照设计的比例混合搅拌均匀后配制成充填料浆; 将配制好的料浆迅速倒入圆柱形模具中并震荡均匀, 终凝 24 h 后拆模; 将试样放置于养护箱进行养护(养护温度, 湿度调节到 20 °C, 93%), 养护龄期达到设计日期后进行力学性能测试, 试样所用的模具和部分充填体试样如图 1 所示。

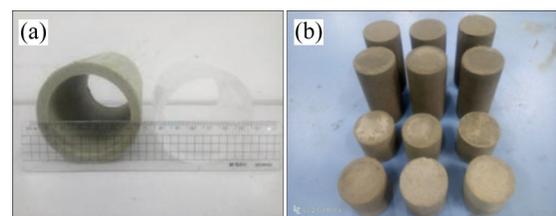


图 1 充填体模具及部分试样

Fig. 1 Backfill mold and some samples: (a) Mould; (b) Backfill

1.2 试验参数确定

该矿山采用分段空场嗣后充填采矿法, 一步骤矿房回采完毕后, 采用充填体对空区进行充填; 当二步骤矿柱回采时, 爆破产生的应力波会对空区内充填体造成冲击。爆破产生的应力波经过空气传递

到充填体表面, 由于波阻抗不同, 部分能量被反射出去; 部分能量则进入充填体内部, 并在孔隙的影响下不断发生反射和透射。当相互叠加的应力波产生的拉应力过大时, 充填体颗粒发生位移, 最后产生裂隙损伤, 损伤后的充填体抗压强度将大大降低^[22]。为了分析采场中爆破对充填体的动载扰动影响, 设置不同冲击速度替代井下爆破振动强度的大小。根据矿山爆破测振仪测出爆破振动速度^[7]推算出井下爆破属于中等应变率, 并结合实验室 SHPB 仪器量程和使用特点, 最终选取 2 m/s、3 m/s、3.5 m/s、4 m/s 四种冲击速度。

1.3 SHPB冲击加载试验

1.3.1 试验设备及原理

本次实验采用直径为 50 mm 的分离式 SHPB 装置加载试验系统, 试验设备结构示意图见图 2 所示, 试验装置主要包括子弹头、入、透射及吸收杆件组成。通过设定四种不同的冲击速度, 即对应四种不同的应变率, 对充填体试件进行冲击压缩。根据一维应力波理论和应力平衡假设, 用于确定试样应变、应变率和应力随时间变化的分析关系如下:

$$\sigma_s(t) = \frac{AE}{A_s} \varepsilon_T(t) \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon}_s(t) = -2 \frac{c_0}{l_s} \varepsilon_R(t) \quad (2)$$

$$\varepsilon_s(t) = -2 \frac{c_0}{l_s} \int_0^t \varepsilon_R(t) dt \quad (3)$$

式中: A 为入射杆的横截面积; A_s 为试件的横截面积; E 为压杆的弹性模量; l_s 为试件的厚度; c_0 为弹性应力波波速; $\varepsilon_R(t)$ 为反射应变; $\varepsilon_T(t)$ 为透射应变; $\sigma_s(t)$ 为试件的动态应力; $\dot{\varepsilon}_s(t)$ 为试样的应变率; $\varepsilon_s(t)$ 为试样的应变。

1.3.2 冲击加载下试样原始波形

在正式进行充填体冲击加载试验前, 为检查 SHPB 冲击加载试验系统是否能够进行正常试验工作, 对其进行多次空冲试验; 即不添加试样, 将杆件轴心对正, 在两杆紧密接触后, 以一定速度进行冲击加载试验, 图 3 所示为空冲加载下的原始波形图。由图 3 可知, 在冲击加载后, 所有的入射波均发生透射, 并且波幅值相近, 可以看出 SHPB 冲击加载系统正常, 可进行加载试验。在验证了 SHPB 冲击加载试验系统能够正常工作后进行充填体试样的冲击加载试验, 选取典型充填体试样冲击加载试验的原始波形如图 4 所示。

2 结果与分析

2.1 充填体试样冲击加载下应力应变曲线

图 5 所示为不同养护龄期充填体试样在动载冲击及单轴加载下的应力-应变曲线。表 1 所示为不同养护龄期充填体试样在冲击加载下的试验结果 (表 1 中的 3-1 为养护龄期达到 3 d 的充填体试样编号, 其余类推), DIF 为动态抗压强度增强因子 (DIF, F_{Df}), 常被用来表示材料抗冲击性能和应变率效应。分析动态抗压强度增强因子能够进一步量化动静加载条件下充填体强度的变化关系。由图 5 可知, 随着应变的逐渐增加, 应力值呈现出明显的非线性特征。进一步观察图 5 中的曲线可知, 与单轴静态加载相比, 充填体的动态压缩应力-应变曲线没有明显的微裂隙压密阶段, 充填体试样在养护 3 d、7 d、14 d 及 28 d 的冲击加载应力-应变曲线均按照特定的曲线形式演化发展, 说明不同养护龄期的充填体试样在受到冲击加载时, 其变形破坏均为同一类损伤过程。

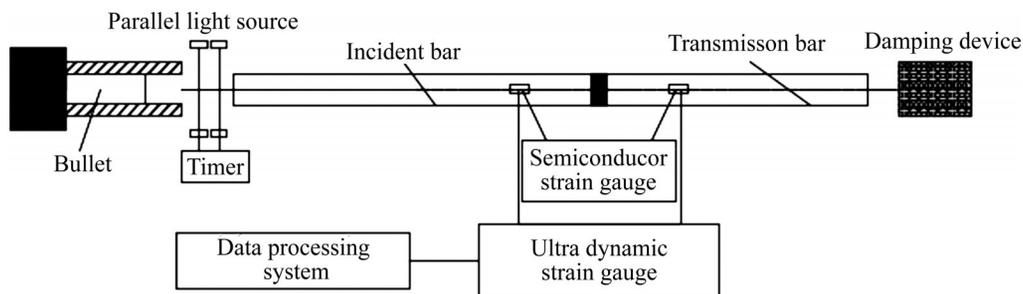


图 2 SHPB 装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of SHPB device

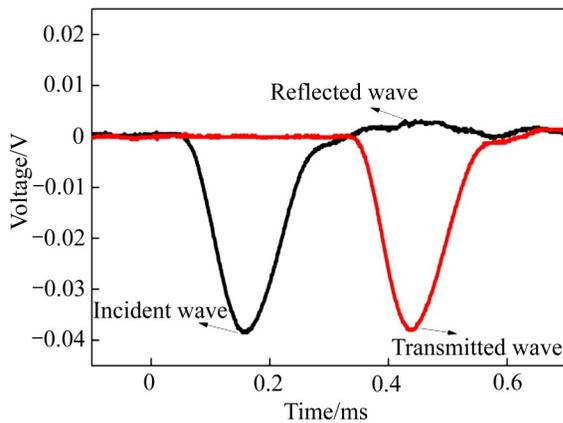


图3 SHPB空冲试验波形图

Fig. 3 SHPB empty shock test waveform

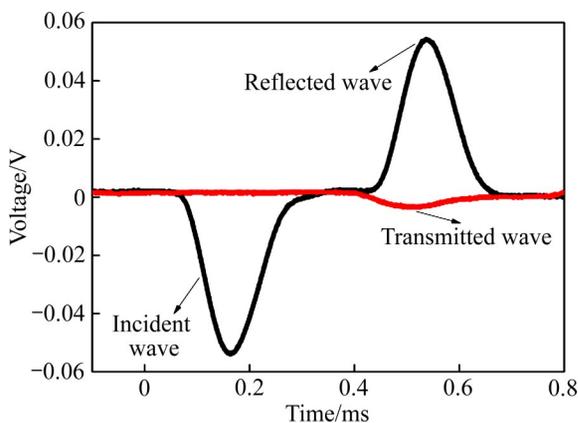


图4 部分试样原始波形图

Fig. 4 Original waveform of some samples

2.2 充填体动态抗压强度增长模型

在单轴静态加载下, 尾砂胶结充填体的抗压强度基本随着养护龄期的延长呈现指数函数递增规律。在本次试验中, 对不同养护龄期内的充填体开展了冲击加载试验。为得到在不同冲击加载速度下, 充填体动态抗压强度随养护龄期的变化模型, 对不同冲击速度下的分级尾砂胶结充填体抗压强度进行非线性拟合, 如图6所示。由图6可知, 在冲击加载下, 随着养护龄期的延长, 充填体动态抗压强度呈现出非线性递增趋势; 由非线性拟合结果可知, 随着养护龄期的延长, 充填体的动态抗压强度基本遵循对数函数 $y = k \cdot \ln(x - a) + b$ 增长规律, 且拟合结果的复相关系数 R^2 都在 90% 以上, 表明回归显著, 模型具有较高的适用性。当冲击速度为 2 m/s 左右时, 随着养护龄期由 3 d 延长至 28 d, 充填体动态抗压强度由 1.07 MPa 增加至 2.01 MPa, 同比增长了 87.8%; 同理, 当冲击速度分别为 3 m/

s、3.5 m/s、4 m/s 左右时, 随着养护龄期由 3 d 延长至 28 d 时, 充填体的动态抗压强度分别增长了 86.8%、53.1%、75.3%。可以看出, 冲击速度越小, 充填体动态抗压强度增幅越明显, 而冲击速度越大; 随着养护龄期的延长, 充填体动态抗压强度增幅较弱。这侧面反映出, 仅依靠延长充填体养护龄期来提升充填体动态力学性能的效果是有限制的, 有必要采取进一步的技术措施用以提升充填体的抗冲击性能。

2.3 充填体峰值抗压强度的应变率效应

将不同养护龄期下的胶结充填体在四种不同应变率下的动态峰值抗压强度与平均应变率进行作图, 如图7(a)所示。从图7(a)中可以看出, 不同养护龄期下, 峰值抗压强度与平均应变率具有明显的线性关系, 即峰值抗压强度随平均应变率的增大呈线性增长趋势。这是因为充填体受到高应变率动态冲击时, 内部产生的裂纹数量和吸收的能量增加, 但裂纹扩展速度小于冲击速度。根据冲量定理或功能原理, 滞后的变形导致应力增加, 从而导致充填体动态抗压强度增大。而当平均应变率相同, 养护龄期越长的充填体试样具有更高的峰值抗压强度。这是因为养护龄期越长的充填体往往具有更加稳固的网络支撑体系, 在受到冲击加载时能够储存更多的能量; 但由于冲击荷载作用时间极短, 充填体没有足够的时间进行能量的耗散, 使得养护龄期越长的充填体往往需要增加更多的应力去抵消外部能量, 从而导致充填体试样的峰值抗压强度随养护龄期的延长而增大。同时, 进一步观察拟合方程平均应变率变量前的系数可知, 养护龄期越长的充填体, 其变量前的系数越大, 说明峰值抗压强度增长越快, 强度值越大。

为更好地描述不同养护龄期下充填体的峰值抗压强度随平均应变率的变化规律, 将不同养护龄期下的胶结充填体在四种不同应变率下的动态抗压强度增强因子与平均应变率进行作图, 如图7(b)所示。从图7(b)可以看出, 随着平均应变率的增加, 充填体试样的动态抗压强度增强因子基本遵循一次函数 $y = kx + b$ 增长规律, 且拟合结果的复相关系数 R^2 都在 90% 以上, 表明回归显著, 模型具有较高的适用性。同时, 由拟合方程中的平均应变率变量前的系数可知, 随着养护龄期的延长, 动态抗压强度增

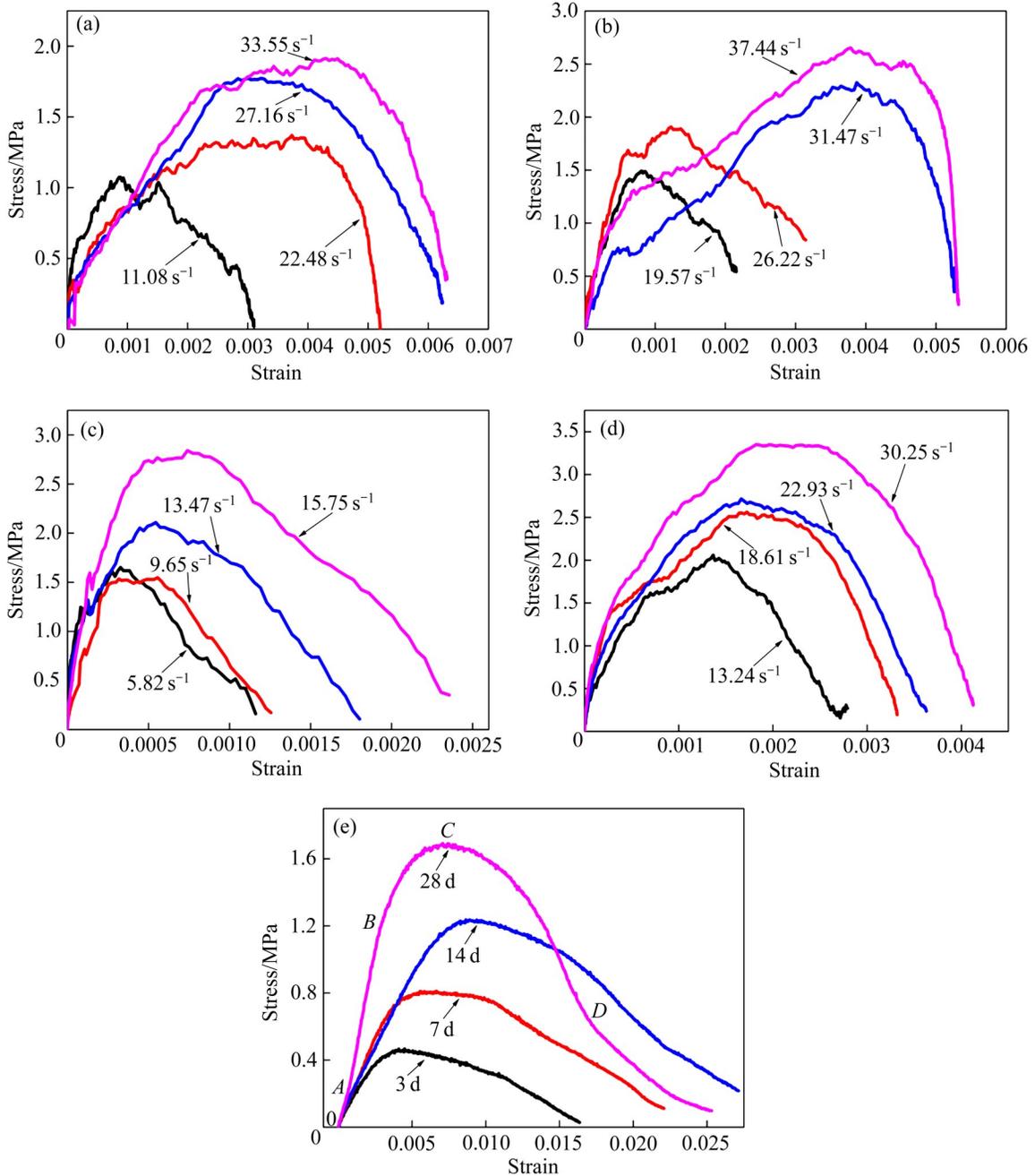


图5 充填体试样动载及静载下的应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of backfill specimens under dynamic and static loads: (a) Dynamic load for 3 d; (b) Dynamic load for 7 d; (c) Dynamic load for 14 d; (d) Dynamic load for 28 d; (e) Static load

强因子的增长速率呈减小的趋势，其增长速率分别为 0.08155(3 d)、0.08545(7 d)、0.09122(14 d) 及 0.04488(28 d)。由此可知，冲击荷载下，随着养护龄期的延长，充填体试样峰值抗压强度的应变率敏感性呈减小的趋势。

2.4 充填体韧性指数随应变率的变化规律

根据图5的全尾砂胶结充填体动态压缩应力-

应变曲线，采用曲线和坐标轴所围成的面积表示充填体在动载冲击载荷下的韧性指数。将不同养护龄期下的胶结充填体试样在四种不同应变率下的韧性指数与平均应变率进行作图，如图8所示。由图8可知，随着平均应变率的增加，充填体的韧性指数基本遵循指数函数 $y = k \cdot \exp(a \cdot x) + b$ 增长规律，且拟合结果的复相关系数 R^2 都在 90% 以上，表明回归显著，模型具有较高的适用性。当养护龄

表 1 充填体试样动载和静载下的试验数据

Table 1 Test data under dynamic load and static load of backfill sample

Sample No.	Impact velocity/ (m·s ⁻¹)	Average strain rate/ s ⁻¹	Dynamic compressive strength/MPa	Static uniaxial strength/MPa	Dynamic impact factor(DIF)
3-1	2.13	12.90	1.07	0.467	2.291
3-2	2.97	20.61	1.37		2.934
3-3	3.67	30.37	1.77		3.790
3-4	3.99	35.36	1.91		4.089
7-1	2.27	19.57	1.42	0.811	1.751
7-2	2.76	26.22	1.90		2.343
7-3	3.68	31.47	2.32		2.861
7-4	4.07	37.44	2.64		3.255
14-1	2.07	5.82	1.65	1.236	1.335
14-2	2.84	9.65	2.11		1.707
14-3	3.77	13.47	2.39		1.934
14-4	3.81	15.75	2.84		2.298
28-1	2.01	13.24	2.01	1.691	1.189
28-2	3.11	18.61	2.56		1.514
28-3	3.59	22.93	2.71		1.603
28-4	4.03	30.25	3.35		1.981

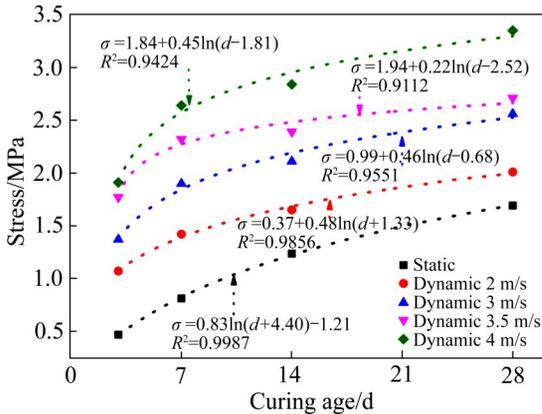


图 6 不同冲击速度下充填体强度曲线

Fig. 6 Strength curves of filling body under different impact speeds

期为 28 d 时, 平均应变率由 13.24 s⁻¹ 增加至 30.25 s⁻¹, 其韧性指数同比增加了 1.84 倍; 同理, 当养护龄期分别为 14 d、7 d 及 3 d 时, 韧性指数分别同比增加了 2.68 倍、3.40 倍及 2.88 倍; 由此可以看出, 当充填体处于养护早期时, 充填体韧性指数的应变率敏感性更高, 韧性指数的增幅更为显著。

2.5 冲击加载下充填体能量变化特征

充填体在受到动态荷载冲击的过程中伴随着能量的改变, 入射能 W_I 、反射能 W_R 、透射能 W_T 及试样吸收能 W_S 间的关系为^[23]:

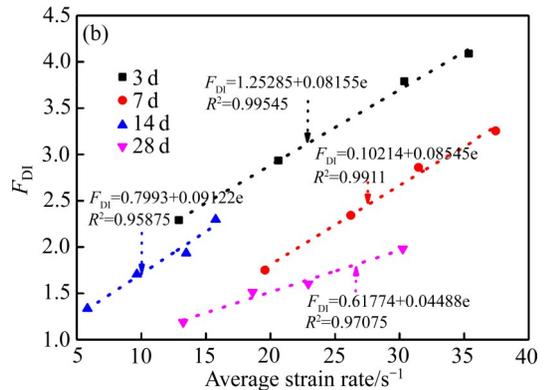
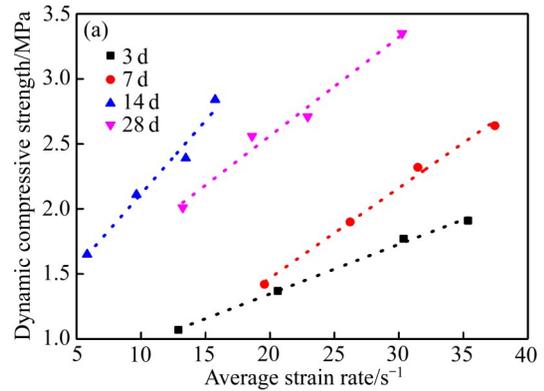


图 7 充填体动态峰值抗压强度与平均应变率的关系

Fig. 7 Relationship between dynamic peak compressive strength of filling body and average strain rate

$$W_S(t) = W_I(t) - W_R(t) - W_T(t) \tag{5}$$

$$W_I(t) = EAc_0 \int_0^t \varepsilon_1^2(t) dt \tag{6}$$

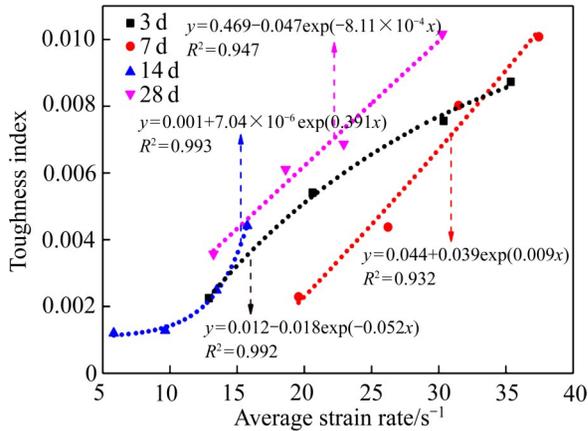


图8 充填体试样韧性指数随平均应变率的变化关系
 Fig. 8 Relationship between toughness index of backfill sample and average strain rate

$$W_R(t) = EAc_0 \int_0^t \varepsilon_R^2(t) dt \quad (7)$$

$$W_T(t) = EAc_0 \int_0^t \varepsilon_T^2(t) dt \quad (8)$$

式中： W_I 为试样的入射能； W_R 为试样的反射能； W_T 为试样的透射能； W_S 为试样的吸收能。

参考岩石动力学中表征试样单位体积内吸收能的方法，引入比能量吸收量 (Specific energy

absorption, E_{SA})对充填体单位体积内吸收能进行表征，其计算方法如式(9)所示^[24]：

$$E_{SA} = \frac{W_S}{V_S} \quad (9)$$

式中： W_S 为试样的吸收能，J； V_S 为试样的体积， cm^3 。

根据上述各类能量计算公式，对尾砂胶结充填体动态冲击过程中的能量值进行测试计算，计算结果如表2所示。

将表2中充填体试样的吸收能、比能量吸收与平均应变率进行作图，如图9所示。同时，为定量表明养护龄期对充填体吸收能、比能量吸收间的关系，将吸收能、比能量吸收与养护龄期进行作图，如图10所示。由图9可知，当养护龄期固定不变时，随着平均应变率的增加，充填体的吸收能、单位体积应变能(比能量吸收)均基本遵循指数函数 $y = k \cdot \exp(a \cdot x) + b$ 增长规律，且拟合结果的复相关系数 R^2 都在80%以上，表明回归显著，模型具有较高的适用性。当养护龄期为28 d时，随着平均应变率由 $13.24 s^{-1}$ 增加至 $30.25 s^{-1}$ ，其吸收能、单位体积应变能分别增长了1.06、1.08倍；同理，当养护龄期分别为14 d、7 d及3 d时，充填体的吸收

表2 冲击加载下充填体试样的能量值
 Table 2 Energy value of filling sample under impact loading

Sample No.	Impact velocity/ ($m \cdot s^{-1}$)	Average strain rate/ s^{-1}	Dynamic compressive strength/MPa	Absorbed energy/J	Specific energy absorption/($J \cdot cm^{-3}$)
3-1	2.13	12.90	1.07	0.294	0.0030
3-2	2.97	20.61	1.37	0.404	0.0041
3-3	3.67	30.37	1.77	0.542	0.0055
3-4	3.99	35.36	1.91	0.745	0.0076
7-1	2.27	19.57	1.42	0.385	0.0039
7-2	2.76	26.22	1.90	0.617	0.0063
7-3	3.68	31.47	2.32	0.782	0.0080
7-4	4.07	37.44	2.64	0.904	0.0092
14-1	2.07	5.82	1.65	0.541	0.0055
14-2	2.84	9.65	2.11	0.681	0.0069
14-3	3.77	13.47	2.39	0.815	0.0083
14-4	3.81	15.75	2.84	0.931	0.0095
28-1	2.01	13.24	2.01	0.623	0.0063
28-2	3.11	18.61	2.56	0.842	0.0086
28-3	3.59	22.93	2.71	1.193	0.0122
28-4	4.03	30.25	3.35	1.281	0.0131

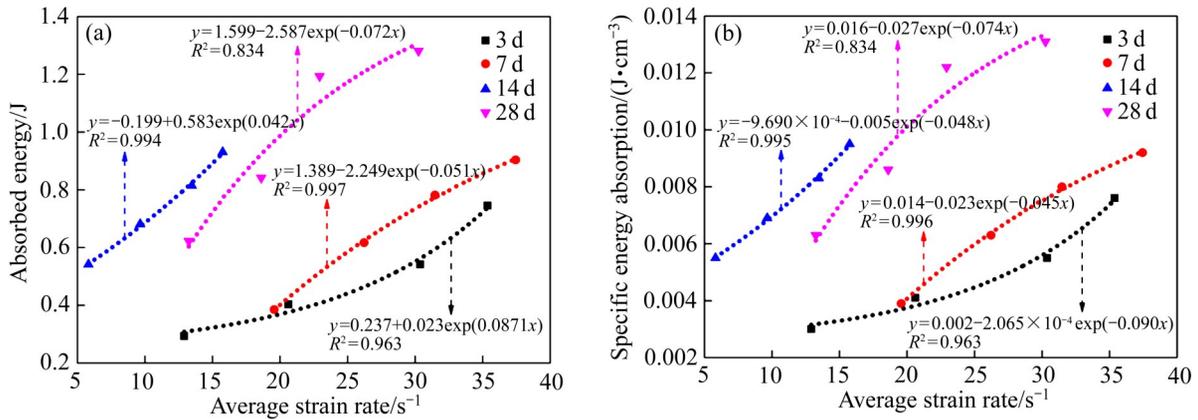


图 9 充填体能量值随平均应变率的变化关系

Fig. 9 Relationship between energy value of backfill and average strain rate: (a) Absorbed energy; (b) Specific energy absorption

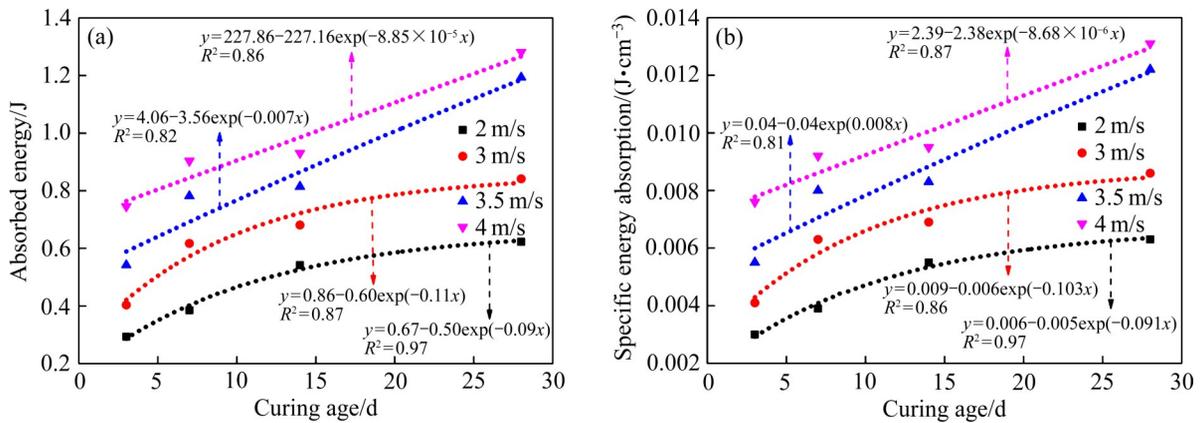


图 10 充填体的能量值随养护龄期的变化关系

Fig. 10 Relationship between energy value of backfill and curing age: (a) Absorbed energy; (b) Specific energy absorption

能、单位体积应变能分别增长了 0.72 倍、0.73 倍, 1.35 倍、1.36 倍, 1.54 倍、1.53 倍。可以看出, 在养护早期, 充填体能量值的应变率敏感性更高, 随应变率的增加, 能量值增幅更为显著。同时, 当养护龄期固定不变时, 平均应变率越高的充填体具有更高的吸收能和单位体积应变能, 从侧面反映了应变率的增大提高了充填体的屈服强度。

由图 10 可知, 当冲击加载速度固定不变时, 随着养护龄期的延长, 充填体的吸收能、单位体积应变能(比能量吸收)均基本遵循指数函数 $y = k \cdot \exp(a \cdot x) + b$ 增长规律, 且拟合结果的复相关系数 R^2 都在 80% 以上, 表明回归显著, 模型具有较高的适用性。当冲击加载速度为 2 m/s 左右时, 养护龄期由 3 d 延长至 28 d, 充填体的吸收能、单位体积应变能分别增长了 1.12 倍、1.10 倍; 同理, 当

冲击加载速率为 3 m/s、3.5 m/s 及 4 m/s 左右时, 养护龄期由 3 d 延长至 28 d, 充填体的吸收能、单位体积应变能分别增长了 1.09 倍、1.10 倍, 1.20 倍、1.22 倍, 0.72 倍、0.73 倍。可以看出, 当养护龄期由 3 d 延长至 28 d 时, 不同的冲击速度下, 充填体的能量值增幅存在一定的差异性, 没有体现出明显的规律, 原因可能在于每一个养护龄期下的充填体冲击加载试验中其冲击速度难以控制在一个精准值, 不能很好地固定其冲击速度。但观察图 10 中的曲线可知, 加载速率在 2 m/s、3 m/s、3.5 m/s 及 4 m/s 左右时, 养护龄期越长的充填体其吸收能、单位体积应变能均越大, 说明养护龄期越长的充填体在冲击变形破坏时需要吸收更多的能量, 从侧面反映了养护龄期的延长能够在一定程度上提高其动态力学性能。

2.6 胶结充填体冲击变形破坏特征

在不同养护龄期下,胶结充填体的力学性能存在一定的差异性,因此在冲击荷载作用下其变形破坏形态也必不相同。本文进一步揭示了不同养护龄期下的充填体在冲击荷载作用下的变形破坏特征。图11所示为养护龄期为28 d,不同应变率作用下的分级尾砂胶结充填体变形破坏特征;图12所示为冲击速度为4 m/s左右,不同养护龄期下的充填体变形破坏特征。

由图11可知,平均应变率范围对分级尾砂胶结充填体的变形破坏特征具有显著的影响,随着平均应变率的逐渐增大,充填体的破坏形态逐渐趋于严重。当平均应变率为 13.24 s^{-1} 时,充填体未发生破坏,且无明显的宏观破坏裂纹;当平均应变率范围大于 18.61 s^{-1} 时,充填体表面出现了明显的轴向拉伸宏观裂纹,且平均应变率越大,其宏观破坏裂纹更多,充填体的破坏越严重。

由图12可知,当冲击加载速度为4 m/s左右时,在不同的养护龄期下,充填体的变形破坏形态具有显著的差异性。当养护龄期为3 d时,充填体

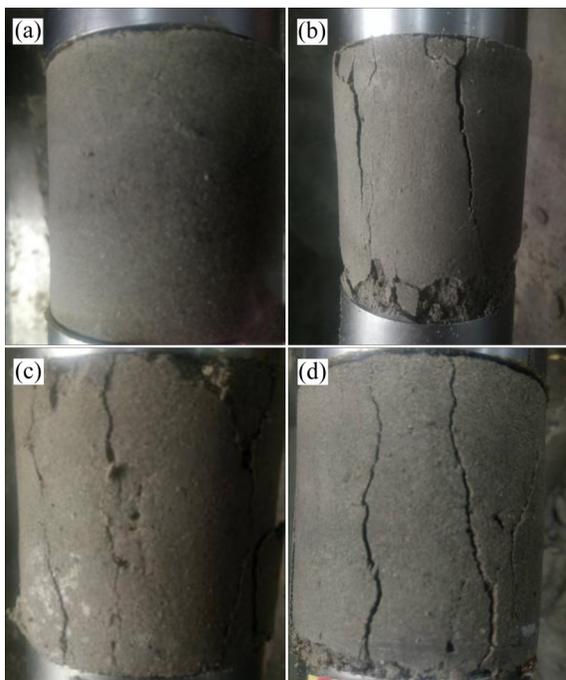


图11 不同平均应变率下分级尾砂胶结充填体变形破坏特征

Fig. 11 Deformation and failure characteristics of graded tailings cemented backfill under different average strain rates: (a) $\dot{\epsilon}_s = 13.24\text{ s}^{-1}$; (b) $\dot{\epsilon}_s = 18.61\text{ s}^{-1}$; (c) $\dot{\epsilon}_s = 22.93\text{ s}^{-1}$; (d) $\dot{\epsilon}_s = 30.25\text{ s}^{-1}$

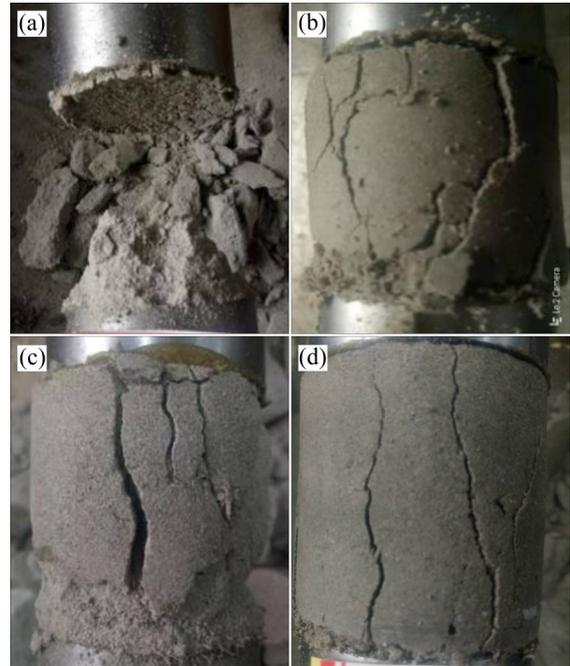


图12 不同养护龄期下分级尾砂胶结充填体变形破坏特征

Fig. 12 Deformation and failure characteristics of graded tailings cemented backfill under different curing ages: (a) 3 d; (b) 7 d; (c) 14 d; (d) 28 d

的破坏最为严重;当养护龄期为7 d及14 d时,充填体试样能够保持较高的完整性,但充填体与入射杆的接触面破坏较为严重;而当充填体达到28 d后,充填体破坏形态主要为轴向拉伸破坏,且试样保持了可观的完整性。

通过对不同冲击荷载下充填体的变形破坏特征的研究可以看出:当养护龄期固定不变时,平均应变率越大,充填体的破坏便越严重;随着平均应变率的逐渐增大,充填体的破坏形态主要为轴向拉伸破坏。当冲击速度固定不变时,养护龄期对充填体破坏形态具有较大的影响,具体表现为养护龄期越短,充填体破坏越严重;而养护龄期越长的充填体由于水泥水化反应所生成的C-S-H凝胶越多,颗粒间的黏结力更强,使得养护后期的充填体具有更强的抗冲击变形能力,因此在冲击荷载下仍能保持较高的完整性。

3 结论

1) 动态冲击加载下,充填体动态抗压强度随养

护龄期的延长呈非线性递增,随平均应变率的增大呈线性增长,且动态抗压强度增幅与冲击速度呈负相关。随平均应变率的增加,充填体动态抗压强度增强因子呈线性增长,且随着养护龄期的延长,动态强度增强因子的增长速率和峰值抗压强度的应变率敏感性均呈减小趋势。

2) 动载冲击加载下,随平均应变率的增加,充填体的韧性指数遵循指数函数增长规律,且充填体养护早期的韧性指数应变率敏感性更高、增幅更显著。

3) 动载冲击加载下,随平均应变率的增加,充填体的吸收能、单位体积应变能(比能量吸收)均遵循指数函数增长规律;且充填体在养护早期的能量值应变率敏感性更高、增幅更明显。同一冲击速度下,随着养护龄期的延长,充填体的吸收能、单位体积应变能(比能量吸收)均增大,从侧面反映出养护龄期的延长能够在一定程度上提高充填体动态力学性能。

4) 动态冲击加载下,充填体的破坏程度随平均应变率的增大表现越显著,且破坏形态主要为轴向拉伸破坏。同一冲击速度下,养护龄期越短,充填体破坏越严重;而养护龄期越长,充填体则具有更强的抗冲击变形能力。

REFERENCES

- [1] 王青,任凤玉. 采矿学[M]. 北京:冶金工业出版社,2011: 327-332.
WANG Qing, REN Feng-yu. Mining[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2011: 327-332.
- [2] HASSANI F, MORTAZAVI A, SHABANI M. An investigation of mechanisms involved in backfill-rock mass behaviour in narrow vein mining[J]. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 2008, 108(8): 463-472.
- [3] HUANG Gang, CAI Si-jing, ZHANG Ya-dong, et al. Experimental and modeling study on the strength of tailings backfill in underground mine[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 522/523/524: 1390-1393.
- [4] 徐文彬,杜建华,宋卫东,等. 超细全尾砂材料胶凝成岩机理试验[J]. 岩土力学, 2013, 34(8): 2295-2302.
XU Wen-bin, DU Jian-hua, SONG Wei-dong, et al. Experiment on the mechanism of consolidating backfill body of extra-fine grain unclassified tailings and cementitious materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(8): 2295-2302.
- [5] 高建科,杨长祥. 金川二矿区深部采场围岩与充填体变形规律预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(S2): 2625-2632.
GAO Jian-ke, YANG Chang-xiang. Deformation rule of wall rock and filling in deep stope in deposit 2 of Jinchuan[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(S2): 2625-2632.
- [6] 赵树果,苏东良,吴文瑞,等. 基于Weibull分布的充填体单轴压缩损伤模型研究[J]. 中国矿业, 2017, 26(2): 106-111.
ZHAO Shu-guo, SU Dong-liang, WU Wen-rui, et al. Study on damage model of backfill based on Weibull distribution under uniaxial compression[J]. China Mining Magazine, 2017, 26(2): 106-111.
- [7] 董凯程. 爆破地震对充填体影响与控制技术研究[D]. 长沙:中南大学,2010.
DONG Kai-cheng. Research on the influence and control techniques of blasting seismic wave on backfill[D]. Changsha: Central South University, 2010.
- [8] LIU Zhi-xiang, LAN Ming, XIAO Si-you, et al. Damage failure of cemented backfill and its reasonable match with rock mass[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(3): 954-959.
- [9] 刘志祥,李夕兵,戴塔根,等. 尾砂胶结充填体损伤模型及与岩体的匹配分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(9): 1442-1446.
LIU Zhi-xiang, LI Xi-bing, DAI Ta-gen, et al. On damage model of cemented tailings backfill and its match with rock mass[J]. Geotechnical Mechanics, 2006, 27(9): 1442-1446.
- [10] 聂亚林,王晓军,黄广黎,等. 不同含水率纯尾砂胶结充填体强度及损伤模型分析[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(6): 2008-2013.
NIE Ya-lin, WANG Xiao-jun, HUANG Guang-li, et al. Strength and damage model analysis of pure tailings cemented filling body with different water content[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(6): 2008-2013.
- [11] 赵康,朱胜唐,周科平,等. 钽铌矿尾砂胶结充填体力学特性及损伤规律研究[J]. 采矿与安全工程报, 2019, 36(2): 413-419.
ZHAO Kang, ZHU Sheng-tang, ZHOU Ke-ping. Research on mechanical properties and damage law of tantalum-niobium ore cemented tailings backfill[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(2): 413-419.
- [12] 曹帅. 胶结充填体结构与动力学特性研究及应用[D]. 北京:北京科技大学,2017.
CAO Shuai. Research on structural characteristics and

- dynamic effects of cemented tailing backfilling and its application[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2017.
- [13] LU Yong, XU Kai. Modelling of dynamic behaviour of concrete materials under blast loading[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2004, 41(1): 131-143.
- [14] 李雪珍. 掺早强剂全尾砂胶结充填体的动静态力学特性试验[D]. 赣州: 江西理工大学, 2017.
- LI Xue-zhen. Experimental on the static and dynamic mechanical properties of the early strength agent doped full tailings cemented backfill[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2017.
- [15] 余姚. 膨润土对胶结充填体动静态力学特性的影响研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2019.
- YU Yao. Effect of bentonite on dynamic and static mechanical properties of cemented backfill[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2019.
- [16] 侯永强, 张耀平, 王磊, 等. 干燥及饱水充填体的动载破坏特性研究[J]. *化工矿物与加工*, 2017, 46(7): 38-41, 45.
- HOU Yong-qiang, ZHANG Yao-ping, WANG Lei, et al. Research on dynamic load failure characteristics of dry and saturated backfill[J]. *Industrial Minerals & Processing*, 2017, 46(7): 38-41, 45.
- [17] 王俊程, 付玉华, 侯永强, 等. 不同配合比下尾砂充填体的动载冲击破坏研究[J]. *矿业研究与开发*, 2017, 37(3): 8-13.
- WANG Jun-cheng, FU Yu-hua, HOU Yong-qiang, et al. Research on the dynamic load impact damage of tailings filling bodies with different mixture ratios[J]. *Mining Research and Development*, 2017, 37(3): 8-13.
- [18] ZHANG Yun-hai, WANG Xin-min, WEI Chong, et al. Dynamic mechanical properties and instability behavior of layered backfill under intermediate strain rates[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2017, 27(7): 1608-1617.
- [19] 杨伟, 陶明, 李夕兵, 等. 高应变率下灰砂比对全尾胶结充填体力学性能影响[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2017, 38(11): 1659-1663.
- YANG Wei, TAO Ming, LI Xi-bing, et al. Mechanical properties of the total tailing cemented backfilling impacted by cement-sand ratio under high strain rate[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science Edition)*, 2017, 38(11): 1659-1663.
- [20] 朱鹏瑞, 宋卫东, 徐琳慧, 等. 冲击荷载作用下胶结充填体的力学特性研究[J]. *振动与冲击*, 2018, 37(12): 131-137, 166.
- ZHU Peng-rui, SONG Wei-dong, XU Lin-hui, et al. A study on mechanical properties of cemented backfills under impact compressive loading[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(12): 131-137, 166.
- [21] ZHOU Y X, XIA K, LI X B, et al. Suggested methods for determining the dynamic strength parameters and mode-I fracture toughness of rock materials[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2012, 49: 105-112.
- [22] 朱鹏瑞, 宋卫东, 曹帅, 等. 爆破动载下胶结充填体的张拉力学响应机制[J]. *采矿与安全工程学报*, 2018, 35(3): 605-611.
- ZHU Peng-rui, SONG Wei-dong, CAO Shuai, et al. Tensile mechanical response mechanism of cemented backfills under blasting load[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2018, 35(3): 605-611.
- [23] 杨伟, 张钦礼, 杨珊, 等. 动载下高浓度全尾砂胶结充填体的力学特性[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2017, 48(1): 156-161.
- YANG Wei, ZHANG Qin-li, YANG Shan, et al. Mechanical property of high concentration total tailing cemented backfilling under dynamic loading[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2017, 48(1): 156-161.
- [24] 李夕兵, 宫凤强, ZHAO J, 等. 一维动静组合加载下岩石冲击破坏试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(2): 251-260.
- LI Xi-bing, GONG Feng-qiang, ZHAO J, et al. Test study of impact failure of rock subjected to one-dimensional coupled static and dynamic loads[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(2): 251-260.

Mechanical behavior and deformation failure characteristics of cemented tailings backfill under impact loading

YANG Shi-xing^{1,2}, WANG Hong-jiang^{1,2}, HOU Yong-qiang^{1,2}, ZHANG Min-zhe^{1,2}

(1. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of High-Efficient Mining and Safety of Metal Mines, Ministry of Education, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to study the dynamic characteristics of graded tailings cemented backfill with different curing ages under medium strain rate dynamic impact loading, the split Hopkinson bar (SHPB) test technology was used to conduct single impact test on 48 backfill samples of 16 groups. The results show that the dynamic compressive strength and dynamic compressive strength improvement factor of backfill increase linearly with the increase of average strain rate. As the curing age increases, the strain rate sensitivity shows a decreasing trend, and the dynamic compressive strength increase is negatively correlated with the impact speed. The toughness index of backfill increases exponentially with the increase of average strain rate, and the strain rate sensitivity of early curing period increases. The absorption energy and strain energy per unit volume (specific energy absorption) of backfill have significant positive correlation with strain rate and curing age, and the sensitivity of energy value strain rate in early curing period is higher and the increase is more obvious. Under dynamic impact loading, the failure mode is mainly axial tensile failure, and the higher the average strain rate and the shorter the curing age, the more significant the damage.

Key words: filling body; strain rate; curing age; dynamic strength; absorbed energy per unit volume; failure mode

Foundation item: Projects(2017YFC0602903, 2018YFC0603705) supported by the National Key Research Development Program of China; Project(51834401) supported by the National Natural Science Foundation of China

Received date: 2020-11-09; **Accepted date:** 2021-05-06

Corresponding author: WANG Hong-jiang; Tel: +86-15901196527; E-mail: wanghj1988@126.com

(编辑 何学锋)