



SHPB 冲击荷载下碱化水稻秸秆基尾砂胶结充填体动态力学性能响应

宋学朋¹, 王 石¹, 魏美亮¹, 刘 武¹, 王晓军¹, 陶铁军², 王 婕³

(1. 江西理工大学 资源与环境工程学院, 赣州 341000;

2. 贵州大学 土木工程学院, 贵阳 550025;

3. 江西理工大学 建筑与测绘工程学院, 赣州 341000)

摘 要: 充填采矿过程中, 充填体不可避免的经历开挖和爆破等动态扰动, 降低了充填体的稳定性。为此, 将成本低、来源广的农业废弃物水稻秸秆掺加到尾砂胶结充填体中, 采用分离式霍普金森压杆(SHPB)研究了掺不同含量碱化水稻秸秆(经 NaOH 溶液碱化处理)的充填体在单次与循环冲击荷载下的动态力学特征。结果表明: i) 单次冲击荷载下, 所有充填体均具有明显的应变率增强效应, 而碱化水稻秸秆的掺入显著提高了充填体的动态抗压强度; 随着碱化水稻秸秆含量由 0%增加至 0.4%, 充填体的动态抗压强度先增加再减小, 充填体的动态抗压强度增幅 14.06%~26.81%, 碱化水稻秸秆最佳掺量为 0.3%。ii) 掺碱化水稻秸秆的充填体应变更大; 随着平均应变率增加, 充填体的破坏程度逐渐加剧, 但是碱化水稻秸秆的掺入更能维持充填体的稳定性, 最终碎裂破坏时块体更大。iii) 相同冲击次数的循环冲击荷载下, 掺碱化水稻秸秆的充填体动态抗压强度更大, 且碱化水稻秸秆最佳掺量仍为 0.3%。iv) 碱化水稻秸秆表面被水泥水化产物覆盖, 提高了其与充填体基体的粘结强度, 使碱化水稻秸秆在充填体基体内部起到桥连作用, 抑制裂纹的扩展, 为预脱落的块体提供拉力, 进而改善了充填体的动态力学特征。碱化水稻秸秆显著提高了充填体的稳定性与抗冲击性能, 更有利于提高井下作业的安全性。

关键词: 碱化水稻秸秆; 冲击荷载; 尾砂胶结充填体; 动态抗压强度; SHPB

文章编号: 1004-0609(2021)-xx- -

中图分类号: TD853

文献标志码: A

引文格式: 宋学朋, 王 石, 魏美亮, 等. SHPB 冲击荷载下碱化水稻秸秆基尾砂胶结充填体动态力学性能响应[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(x): xxxx-xxxx. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-36640

SONG Xue-peng, WANG Shi, WEI Mei-liang, et al. Response of dynamic mechanical properties of alkali rice straw based cemented tailings backfill under SHPB impact load[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(x): xxxx-xxxx. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-36640

与传统的崩落法、空场法相比, 尾砂胶结充填采矿法以其具有控制采空区地压、减少地表下沉、充分利用矿山废弃物、提高矿石回收率的优点而被世界范围内的地下矿山广泛采用^[1-4]。尾砂胶结充填就是将尾砂与胶凝材料、水、或添加剂等在地表充填站混合, 制备成具有一定浓度与流动性的充填料浆, 通过管道(泵送或自流)输送到地下采空

区^[5-6]。采空区中的充填材料硬化后逐渐具备吸收、转移和隔离应力的能力, 进而支撑地表, 改善井下作业环境^[7]。因此, 充填体的力学性能是其发挥作用的关键。然而, 在地下采空区, 充填体除遭受上覆岩层移动等缓慢准静态荷载外, 还受到临近矿体爆破开挖产生的冲击荷载的干扰, 尤其是频繁爆破作业下, 充填体内部损伤逐渐累计, 降低了充填体

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51804134, 51804135); 江西省自然科学基金资助项目(20181BAB216013); 江西理工大学清江青年英才支持计划资助(JXUSTQJYX2019007)

收稿日期: 2020-10-23; **修订日期:** 2021-02-28

通信作者: 王 石, 副教授, 博士; 电话: 15570073478; E-mail: sxp9612@126.com

的承载能力^[8-11]。

关于充填体在冲击荷载下力学行为的研究较多, 谭玉叶等^[9]利用分离式霍普金森杆(SHPB)对充填体进行了单次与多次循环冲击试验, 发现循环冲击下充填体最终强度为单次冲击的2倍, 且破坏程度相对较低。CAO等^[12]研究了平均应变率对尾砂胶结复合材料动态抗压强度的影响; 结果表明, 动态抗压强度随平均应变率的增加而成指数增长。LIU等^[13]研究了水分损失对超细尾砂-高炉矿渣充填体动态力学性能的影响, 发现水分损失弱化了充填体的动态强度。CAO等^[14]利用SHPB试验确定了动态峰值抗压强度与平均应变率、灰砂比、养护龄期之间的关系。ZHANG等^[10]采用SHPB对层状充填体进行了冲击荷载试验; 结果表明动态抗压强度与应变率呈正相关, 随着灰砂比的增大动态抗压强度增加, 并利用改进的Stenerding-Lehnigk断裂准则分析了分层充填体的断裂状态。杨伟等^[15]研究了动静荷载下高浓度全尾砂胶结充填体的力学性能; 结果表明, 随着应变率的增加, 充填体的抗压强度、动态强度增长因子、峰值应变随之增大。HUANG等^[16]以水泥含量、养护时间、应变率为影响因素, 借助改进的SHPB装置研究了胶结膏体充填体动态抗压强度的变化。以上文献从强度影响因素、外部荷载、充填体结构等角度对充填体动态力学性能展开深入研究, 并取得一定的研究成果。然而根据以上研究, 充填体具有脆性高强度较低的特点, 在冲击荷载下内部损伤演化, 导致强度迅速降低, 极易发生失稳破坏。为了改善充填体的强度, 一些化学外加剂^[18-20]、合成纤维^[17, 21-23]等被添加到充填体中, 虽然改善了充填体的强度, 但是考虑到材料的经济性和环境友好性, 化学外加剂与合成纤维等材料的应用仍具有一定的局限性。而在混凝土方面, 稻草作为最古老的植物纤维之一已经拥有几百年的历史^[24-25]。其中, 文献[24-26]研究了稻草作为混凝土增强材料, 发现稻草能够明显改善混凝土的物理力学性能。而全尾砂胶结充填体与混凝土具有一定的相似性, 同时WANG等^[27]将碱化处理的农业废弃物水稻秸秆应用于尾砂胶结充填中, 显著提高了充填体的力学性能, 并获得了水稻秸秆的最佳长度。CHEN等^[28]添加水稻秸秆到尾砂胶结充填体中, 显著提高了充填体的单轴抗压强度和弹性模量。上述研究表明, 水稻秸秆能够改善充填体的力

学性能。然而对掺水稻秸秆的充填体在冲击荷载下的动态力学特性的研究鲜有报道, 在地下采空区中充填体将不可避免的遭受冲击荷载扰动。同时大量试验研究显示, 材料在不同应变速率下的力学行为不同^[9]。因此, 探索碱化水稻秸秆基尾砂胶结充填体的动态力学特征具有一定的研究价值。

本文采用分离式霍普金森压杆(SHPB)系统对掺不同含量碱化水稻秸秆(Alkalized rice straw)(经4%NaOH溶液碱化处理)的尾砂胶结充填体(Cemented tailings backfill)进行单轴单次与循环冲击荷载试验, 获得不同冲击条件下掺碱化水稻秸秆的尾砂胶结充填体的动态抗压强度、应力应变曲线特征与破坏形态, 并借助这些参数分析和研究碱化水稻秸秆对充填体动态力学特征的影响规律; 利用扫描电镜(SEM)和能谱分析(EDS)分析了碱化水稻秸秆与充填体基体之间的微观作用关系。

1 实验

1.1 实验材料

1) 尾砂

实验所用尾砂来自江西省某铜矿。利用激光粒度仪(Winner 2000)与X射线荧光光谱分析(XRF)对其物理化学性质进行检测, 如图1和表1所示。能够发现小于20 μm的颗粒大约占20%, 小于2 μm的颗粒大约仅占5%, 75 μm以下颗粒约占57.8%, 尾砂粒度属于中等偏细。颗粒的不均匀系数 $C_u(d_{60}/d_{10})$ 与曲率系数 $C_c(d_{30}^2/d_{60} \times d_{10})$ 分别为18.98、2.53, 表明该铜矿尾砂粒径分布较广, 颗粒级配的

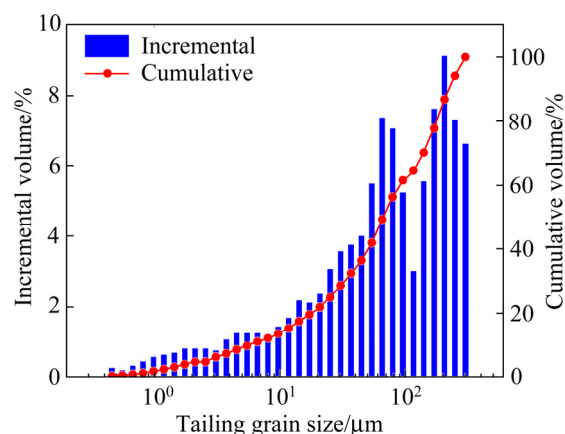


图1 尾砂颗粒尺寸分布

Fig. 1 Particle size distribution of tailing

表 1 尾砂的化学组成

Table 1 Chemical composition of tailings (mass fraction, %)

SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe	S
33.02	15.68	1.82	2.56	10.37	4.55
Pb	Mn	F	K	P	Cu
0.0095	0.085	0.080	0.37	0.049	0.065

连续性较好。尾砂中 Si 与 Ca 的含量达 48%，有利于充填体强度的发展。

2) 碱化水稻秸秆

水稻秸秆来自于江西赣州当地农村。据已有研究，水稻秸秆中含有纤维素、半纤维素、木质素和灰分，而纤维素与半纤维素是由多糖单元组成，在碱性条件下生成的产物会抑制水泥的水化反应^[29-30]。为减缓水稻秸秆对水泥水化的抑制作用，根据先前的研究结果^[27]，本次试验利用 4%浓度的 NaOH 溶液浸泡水稻秸秆 24 h(以下称为碱化水稻秸秆)，清洗至 pH=7 并在 50 ℃下进行烘干。随后，根据 WANG 等^[27]研究结果显示，碱化水稻秸秆的最佳长度为 12 mm。因此，本次试验所用碱化水稻秸秆长度为 12 mm。其掺量分别为水泥质量的 0%、0.1%、0.2%、0.3%、0.4%。

3) 水泥和水

水泥采用矿山常用的普通波特兰水泥(P.O32.5)，混合水为自来水。

1.2 试样制备

本次试验采用灰砂比(水泥与尾砂干质量比) 1:4，质量浓度为 74%的充填配比。首先将尾砂、处理好的碱化水稻秸秆、水泥充分混合，然后加入适量的水在 JJ-5 型搅拌机下搅拌 5 min 至充填料浆完全均匀，倒入 50 mm×50 mm 的圆柱形模具中，待 24 h 脱模后放置在恒温恒湿养护箱(温度为 (20±1) ℃，湿度为 90%)中养护 28 d，对达到养护龄期的试样进行动态冲击试验。详细的试验设计方案见表 2。

表 2 试验方案设计

Table 2 Experimental scheme design

No.	<i>c/t</i>	Mass fraction/%	Length of alkalyzed rice straw/mm	Content of alkalyzed rice straw/%
C-0	1:4	74	12	0
C-1	1:4	74	12	0.1
C-2	1:4	74	12	0.2
C-3	1:4	74	12	0.3
C-4	1:4	74	12	0.4

注释：*c/t*：水泥与尾砂的干质量比

1.3 试验方法

1.3.1 SHPB 动态冲击试验

该本次试验采用分离式霍普金森压杆(Split Hopkinson pressure bar, SHPB)系统，如图 2 所示。通常，应变率在低于 10⁻⁵ s⁻¹ 的范围为静态，而常规试验中的静态试验应变率范围为 10⁻⁵~10⁻³ s⁻¹，

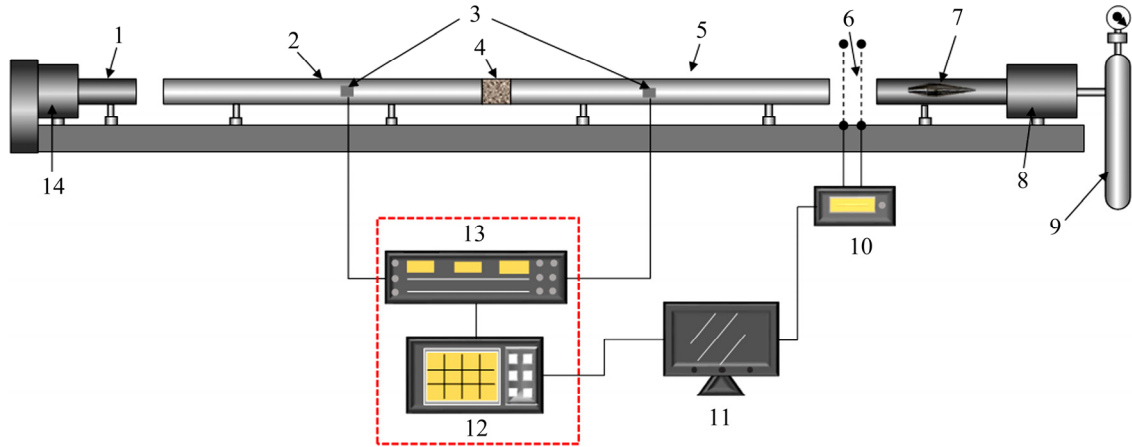


图 2 SHPB 试验系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of SHPB test system: 1—Absorbing bar; 2—Transmission bar; 3—Strain gauge; 4—Specimen; 5—Incident bar; 6—Parallel light source; 7—Bullet; 8—Pressure chamber; 9—Nitrogen bottle; 10—Electronic counter; 11—

Data processing system; 12—Yokowaga D1850e oscillograph; 13—Sdy2017A super dynamic strain amplifier; 14—Damper

此应变率范围为准静态, 应变率效应可忽略不计; 此外, 中等应变率和高应变率范围分别为 $10^{-3}\sim 10^2\text{ s}^{-1}$ 和 10^2 s^{-1} 以上。为了模拟井下临界矿柱爆破对充填体力学行为的影响, 本次试验旨在研究中等应变率左右, 掺不同含量碱化水稻秸秆的充填体的动态力学特征。因此, 经过多次试冲, 试验设置四种不同的冲击速度(对应不同的应变率)对充填体进行单次冲击试验, 利用 75%临界应变率进行循环冲击试验, 单次冲击与循环冲击试验结果见表 3 和表 4。试验过程中, 异形冲头以一定的速度撞入射杆,

产生的应力波沿入射杆传播至杆件界面处一部分发生透射传至透射杆, 最终传至吸收杆; 另一部分发生反射传至入射杆。根据一维应力波理论和应力平衡假设, 试样应变、应变率和应力的计算公式如式(1)~(3)所示。

试验结束后对数据进行剔除和整理, 并对不同冲击条件下的充填体的动态应力平衡进行了检测。由于篇幅有限, 本文只列出了部分充填体试样的检测结果, 如图 3 所示。由图 3 可知, 冲击荷载下充填体试样基本满足动态应力平衡。

表 3 不同碱化水稻秸秆含量的充填体单次冲击荷载试验结果

Table 3 Single impact load test results of backfill with different content of alkalized rice straw

No.	Impact velocity, $C/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	Average strain rate, $\varepsilon/\text{s}^{-1}$	Dynamic compressive strength, σ_s/MPa	No.	Impact velocity, $C/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	Average strain rate, $\varepsilon/\text{s}^{-1}$	Dynamic compressive strength, σ_s/MPa
C-0-1	4.68	52.89	8.32	C-2-3	5.54	86.15	10.96
C-0-2	5.32	59.84	9.14	C-2-4	6.13	101.3	14.31
C-0-3	5.64	89.84	9.76	C-3-1	4.75	54.42	9.49
C-0-4	6.12	101.28	12.50	C-3-2	5.32	77.64	11.59
C-1-1	4.66	49.45	8.49	C-3-3	5.62	88.90	12.18
C-1-2	5.20	63.03	9.64	C-3-4	5.93	104.27	15.67
C-1-3	5.63	84.65	10.27	C-4-1	4.53	54.21	9.08
C-1-4	6.08	97.94	12.83	C-4-2	5.27	61.50	9.88
C-2-1	4.67	52.08	8.99	C-4-3	5.66	91.84	11.63
C-2-2	5.34	69.2	10.36	C-4-4	6.06	101.61	13.94

注释: C-2-4 表示碱化水稻秸秆含量为 0.2%, 第四种平均应变率。

表 4 不同碱化水稻秸秆含量的充填体循环冲击荷载试验结果

Table 4 Cyclic impact load test results of backfill with different content of alkalized rice straw

No.	Impact velocity, $C/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	Dynamic compressive strength, σ_s/MPa	Average strain rate, $\varepsilon/\text{s}^{-1}$	No.	Impact velocity, $C/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	Dynamic compressive strength, σ_s/MPa	Average strain rate, $\varepsilon/\text{s}^{-1}$
C-0-I	3.29	8.02	42.33	C-2-III	3.53	5.31	38.40
C-0-II	3.21	6.78	43.56	C-2-IV	3.26	3.66	36.40
C-0-III	3.40	4.14	37.69	C-3-I	3.20	9.36	45.24
C-0-IV	3.24	2.88	35.85	C-3-II	3.36	8.66	41.21
C-1-I	3.39	8.15	41.30	C-3-III	3.23	7.44	40.25
C-1-II	3.22	6.81	39.86	C-3-IV	3.39	4.39	32.00
C-1-III	3.18	4.62	35.64	C-4-I	3.32	8.32	43.24
C-1-IV	3.31	2.93	32.78	C-4-II	3.08	8.17	40.32
C-2-I	3.31	8.91	44.22	C-4-III	3.45	6.87	40.03
C-2-II	3.25	8.08	41.52	C-4-IV	3.14	3.90	34.70

注释: C-2-IV 表示碱化水稻秸秆含量为 0.2%, 第 IV 次循环冲击。

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

$$\varepsilon_s(t) = -2 \frac{C_0}{l_s} \int_0^t \varepsilon_R(t) dt \quad (2)$$

$$\varepsilon(t) = -2 \frac{C_0}{l_s} \varepsilon_R(t) \quad (3)$$

式中: A 为入射杆的横截面积; A_s 为试样的横截面积; E 为杆的弹性模量; l_s 为试样的高度; 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; $\sigma_s(t)$ 为试样的动态应力; $\varepsilon_s(t)$ 为试样的应变; $\varepsilon(t)$ 为试样的应变率。

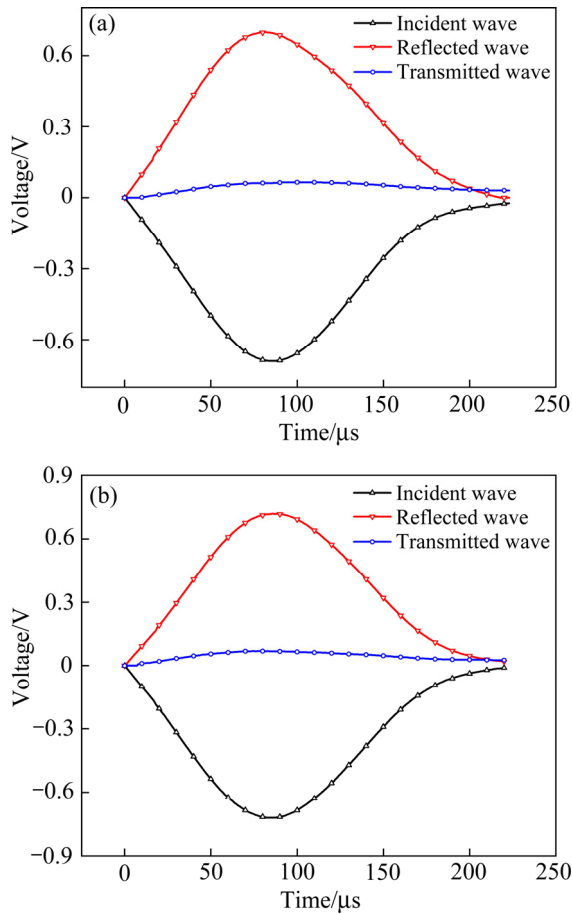


图3 应力波平衡检验

Fig. 3 Stress wave balance test: (a) C-0-1; (b) C-0-2

1.3.2 SEM 测试

利用 SEM(MLA650, USA)对掺不同含量碱化水稻秸秆的充填体进行微观形貌观察。选取冲击后的充填体试块在无水乙醇中浸泡 24 h 终止水泥水化反应,并在 50 °C 下的真空干燥箱中烘干。由于充填体导电性较差,在测试之前对试样喷金处理,抽取真空后即可进行微观形貌观测。

2 结果与讨论

2.1 单次冲击荷载下充填体动态力学特征

2.1.1 充填体的应变率效应

图 4 所示为不同冲击速度下对应的近似平均应变率为 52、66、88、101 s^{-1} (由表 3 可知, SHPB 试验中各组冲击速度近似相等,获得的平均应变率差异较小,为了方便研究,计算了近似相同冲击速度下所对应的应变率的平均值)时的掺不同含量碱化水稻秸秆的尾砂胶结充填体动态抗压强度变化曲线。由图 4 可知,随着近似平均应变率增加,所有充填体试样的动态抗压强度均增加,二者有明显的三次多项式函数关系(拟合系数均大于 0.99)。当近似平均应变率为 52 s^{-1} , C-0~C-4 组中的充填体动态抗压强度分别为 8.32、8.49、8.99、9.49、9.08 MPa,随着近似平均应变率增加,动态抗压强度逐渐增加,且在近似平均应变率为 101 s^{-1} 时,动态抗压强度分别增加至 12.50、12.83、14.31、15.67、13.94 MPa。这个现象表明充填体具有明显的应变率增强效应。这是因为应变率越大对应的冲击速度越大,进而具有较高的入射能,导致充填体在极短时间内吸收大量的能量,而其较低的能量耗散率势必造成充填体通过增加应力的方式来抵消外部能量^[31-32]。此外,从图中能够明显发现,当近似平均应变率达到 88 s^{-1} 时,充填体动态抗压强度表现出迅速增加的现象,表明充填体动态抗压强度对较高的应变率更敏感。

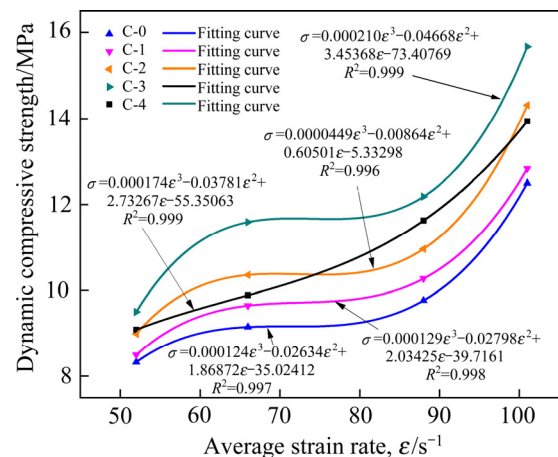


图4 动态抗压强度与平均应变率关系曲线

Fig. 4 Relationship curve between dynamic compressive strength and average strain rate

2.1.2 碱化水稻秸秆含量对充填体动态抗压强度的影响

图5所示为掺不同含量碱化水稻秸秆的尾砂胶结充填体在相同近似平均应变率下(52、66、88、101 s^{-1}), 动态抗压强度随碱化水稻秸秆含量的变化曲线。由图可知, 掺碱化水稻秸秆的充填体动态抗压强度均更大, 碱化水稻秸秆含量由0%增加至0.4%, 充填体的动态抗压强度呈先增加后减小的变化趋势, 二者具有明显的三次多项式关系(拟合系数均在0.94以上)。在碱化水稻秸秆含量为0.3%时强度值最高, 相比C-0组充填体, 在52、66、88、101 s^{-1} 的近似平均应变率下, 动态抗压强度分别提高14.06%、26.81%、24.80%、25.36%。究其原因: 碱化水稻秸秆在充填体基体内部呈三维分布, 将基体分割成许多小单元, 改变了充填体基体内部结构; 碱化水稻秸秆与充填体基体具有较高的粘结强度, 使其在基体内部起到桥连作用, 能够抑制裂纹的传播; 同时, 碱化水稻秸秆的桥连作用为预发生脱落的块体提供拉力, 减缓块体脱落, 提高充填体的受力面积^[27, 31], 进而改善了充填体的动态抗压强度。然而, 随着碱化水稻秸秆含量进一步增加, 充填体强度出现减小的现象。究其原因: 碱化水稻秸秆含量继续增加会相应提高碱化水稻秸秆之间相互重叠、搭接的概率, 导致碱化水稻秸秆之间相交位置与基体的粘结程度弱化, 进而引起桥连作用减弱, 充填体的动态抗压强度降低^[27]。因此, 单次冲击荷载下充填体的最佳碱化水稻秸秆掺量为0.3%。

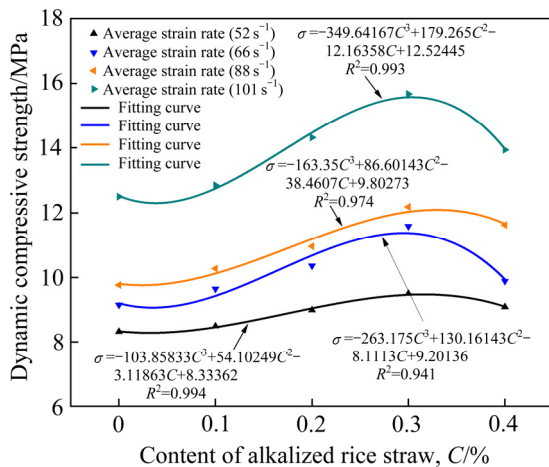


图5 动态抗压强度与碱化水稻秸秆含量关系曲线

Fig. 5 Relationship curve between dynamic compressive strength and alkalinized rice straw content

2.1.3 不同碱化水稻秸秆含量的充填体的动态应力-应变曲线

为了清楚碱化水稻秸秆与平均应变率对充填体动态应力-应变曲线的影响, 选取C-0与C-3组的充填体试样在不同近似平均应变率下的应力-应变曲线为研究对象, 如图6所示。由图6可知: 1) 掺不同含量碱化水稻秸秆的充填体的动态应力-应变曲线与准静态单轴压缩试验下的充填体应力-应变曲线相似, 一般经历微裂隙闭合阶段(冲击荷载下该阶段作用时间极短, 不明显)、弹性变形阶段、非弹性变形阶段、裂纹贯通与破坏阶段。2) 在相同近似平均应变率下, 掺碱化水稻秸秆的充填体峰值强度明显高于未掺碱化水稻秸秆的充填体, 且明显发现掺碱化水稻秸秆的充填体的峰值应变更大, 应力-应变曲线饱满。究其原因: 根据之前的研究^[27], 碱化水稻秸秆内部可能存在未被水泥尾砂填满的情况, 导致内部存在孔隙, 是造成峰值强度前应变增加的主要原因; 而峰值应力以后, 裂纹不断扩展, 裂纹数量增加、变宽, 此时碱化水稻秸秆的桥连作用对块体施加拉力, 有利于试样保持完整性, 增加试样的韧性, 提高承载能力。该现象表明, 碱化水稻秸秆显著影响充填体的应力-应变曲线, 进而引起宏观现象的变化, 如2.1.1与2.1.2节的动态抗压强度变化, 以及充填体的破坏形态(将在下一小节进行分析)。3) 当近似平均应变率低于66 s^{-1} 时, 所有充填体的应力-应变曲线具有较大的应变, 而当平均应变率高于66 s^{-1} 时, 所有充填体应力-应变曲线

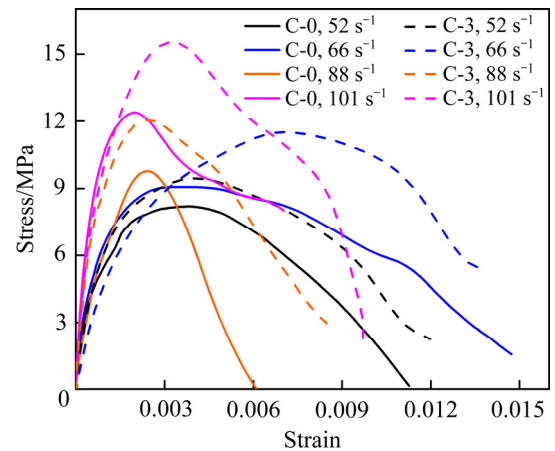


图6 单次冲击下不同碱化水稻秸秆含量的充填体应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curve of backfill with different content of alkalinized rice straw under single impact

达到峰值强度后, 迅速降低, 表明当应变率超过一定值, 充填体的承载能力迅速降低并发生破坏。

2.1.4 不同碱化水稻秸秆含量的充填体破坏形态

尾砂胶结充填体类似于混凝土材料, 内部蕴含有大量的微裂隙、微孔隙、气泡等缺陷, 当充填体受到外部荷载时, 这些缺陷首先发生闭合、扩展、延伸, 逐渐汇聚, 形成贯通充填体试样主裂纹^[32]。此外, 缺陷的发育程度随着外部荷载的增而加剧, 为了清楚碱化水稻秸秆与平均应变率对充填体破坏形态的影响, 选取 C-0、C-3 组的充填体试样在不同近似平均应变率下的破坏形态为研究对象, 如图 7 所示。由图 7 可知: 1) 从整体来看, 随着近似平均应变率由 52 s^{-1} 增加至 101 s^{-1} , 所有充填体试样破坏程度加剧。以 C-0 组充填体试样为例, 由近似平均应变率为 52 s^{-1} 时的倾斜主裂纹和表面脱落, 逐渐发展至近似平均应变率为 66 s^{-1} 时的主裂纹贯通, 大块脱落, 大面积的表面脱落, 最终演化成近似平均应变率为 88 、 101 s^{-1} 时的若干碎块, 充填体发生严重破坏, 完全失去承载能力。这与充填体试样应力应曲线在大于 66 s^{-1} , 达到峰值强度后应力急剧减小相对应。2) 在相同近似平均应变率下, 掺碱化水稻秸秆的充填体试样破坏程度明显更低, 抗冲击性能提高。当近似平均应变率为 52 s^{-1} 时, C-3 组充填体试样表面出现小面积脱落, 右侧存在一条竖直贯穿主裂纹, 左侧和中间部分的裂纹发育较小, 无块体脱落, 完整性较好; 而此时 C-0 组充填体试样存在一条倾斜主裂纹贯穿试样, 表面脱落较大, 完整性显著降低。随着近似平均应变率

继续增加至 66 s^{-1} , C-3 组充填体试样仍保持较好地完整性, 仅有小面积表面脱落, 而 C-0 组充填体试样破坏成三个大块体, 完全失去承载能力。当近似平均应变率增加至 88 、 101 s^{-1} , 能够发现 C-3 组充填体试样破坏后大块更多, 破碎程度相对较小(尤其是近似平均应变率为 88 s^{-1} 时的 C-3 组充填体主要碎裂为三个大块体)。究其原因: 碱化水稻秸秆在充填体基体内部的桥连作用, 在抑制裂纹扩展的同时, 与基体较好地粘结力为即将脱离的块体提供拉力, 减缓了块体分离, 提高了充填体的受力面积。同时碱化水稻秸秆在充填体基体中拔出时消耗部分入射能量, 减缓能量释放, 进而保证了充填体试样在小于 66 s^{-1} 的应变率下具有更高的完整性。综上, 掺碱化水稻秸秆的充填体在冲击荷载下更能保证充填体的完整性, 由此推论, 在实际充填作业中掺碱化水稻秸秆的充填体在爆破等扰动下相比未掺碱化水稻秸秆的充填体更能保证自身的完整性, 有利于提高采矿作业的安全性和降低矿石贫化。

2.2 循环冲击荷载下充填体动态力学特征分析

2.2.1 循环冲击荷载下不同碱化水稻秸秆含量的充填体动态抗压强度特征

根据单次冲击试验结果, 当近似平均应变率为 66 s^{-1} 时, C-0 组充填体试样发生宏观破坏, 而平均应变率为 52 s^{-1} 时可以保持较好的宏观稳定性, 表明破碎失稳的临界应变率在 52 s^{-1} 左右。因此, 为研究充填体在不致使发生较大宏观破坏的应变率下多次冲击时的力学特性及稳定性特征, 循环冲击

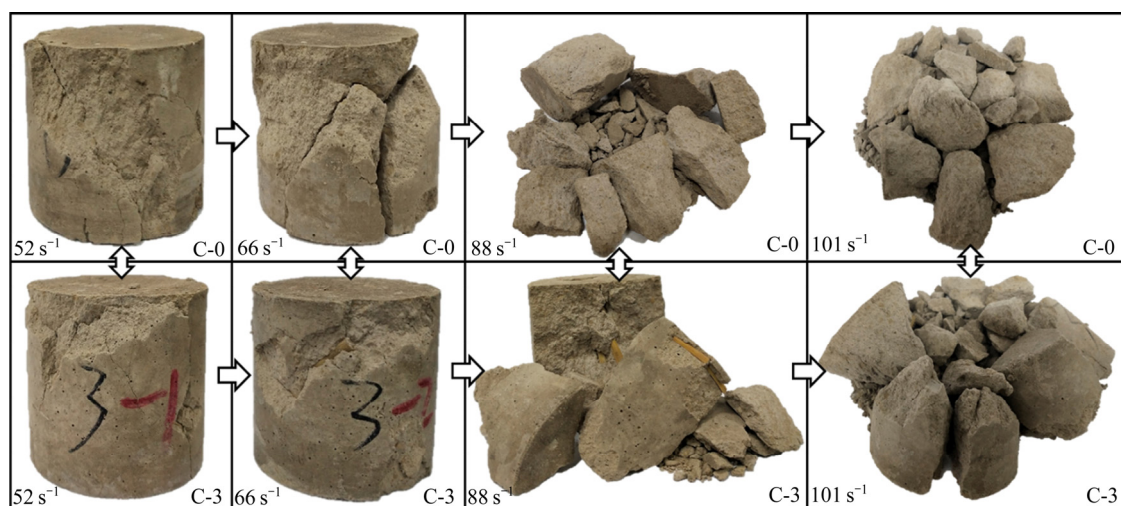


图 7 单次冲击荷载下不同碱化水稻秸秆含量的充填体破坏形态

Fig. 7 Failure morphology of backfill with different content of alkalinized rice straw under a single impact load

荷载应变率应低于 52 s^{-1} 。经过多次试冲, 确定循环冲击荷载试验的应变率为单次冲击荷载下 75% 临界应变率(选择冲击速度范围为 $(3.3 \pm 0.5) \text{ m/s}$)。

循环冲击荷载下不同碱化水稻秸秆含量的充填体动态抗压强度见表 4。图 8 所示为循环冲击荷载下不同碱化水稻秸秆含量的充填体动态抗压强度与冲击次数的关系曲线。由图可知: 1) 在该冲击速度下所有充填体试样均在第四次冲击后发生破坏; 第 I 次冲击时, C-0~C-4 组充填体动态抗压强度分别为 8.02、8.15、8.91、9.36、8.32 MPa, 而随着冲击次数增加, 所有充填体的动态抗压强度均减小, 当进行第 IV 次冲击时, C-0~C-4 组充填体动态抗压强度分别减小至 2.88、2.93、3.66、4.39、3.90 MPa。这是因为在前几次冲击时, 该冲击速度下未造成充填体试样发生宏观破坏, 裂纹扩展缓慢, 充填体具有一定的抗冲击性; 而冲击次数增加, 充填体内部微裂纹逐渐演化扩展, 内部累计损伤增加, 抵抗外部荷载的能力逐渐下降, 导致充填体宏观力学性能下降。当裂纹逐渐扩展贯穿充填体试样后, 在第 IV 次冲击时发生破坏。2) 相同冲击次数下掺碱化水稻秸秆的充填体动态抗压强度明显更大(其中 C-1 组强度变化不明显, 可能与碱化水稻秸秆含量较小, 在该应变率下碱化水稻秸秆在基体内部的桥连作用较弱有关); 且与单次冲击试验结果相似, C-3 组充填体在相同冲击次数下具有更高的动态抗压强度, 相比未掺碱化水稻秸秆的 C-0 组充填体, 动态抗压强度增幅 16.7%~79.7%。在循环冲击荷载

下碱化水稻秸秆的最佳含量依然为 0.3%, 动态抗压强度增幅最大。此外, C-3 与 C-4 组充填体中, 在第 II 次与第 III 次冲击时的动态抗压强度分别高于 C-0 组充填体第 I 次与第 II 次冲击时的动态抗压强度, 表明碱化水稻秸秆有效的改善了充填体基体内部结构, 桥连作用有助于抑制裂纹的扩展, 提高了充填体的承载能力。

2.2.2 循环冲击荷载下不同碱化水稻秸秆含量的充填体应力-应变曲线特征

为了探明循环冲击荷载下碱化水稻秸秆对充填体应力-应变曲线特征的影响, 选取 C-0 与 C-3 组充填体的应力-应变曲线进行对比分析, 如图 9 所示。由图 9 可知: 1) 从整体来看, 类似于单次冲击试验, 循环荷载下充填体的变形过程主要经历微裂隙闭合阶段、弹性变形阶段、非弹性变形阶段、裂纹贯通与破坏阶段。随着冲击次数的增加, 上升阶段的曲线斜率逐渐减小, 表明充填体内部损伤逐渐累积, 抵抗变形的能力下降。2) 相同冲击次数, C-3 组充填体的应力-应变曲线饱满, 应变值更大。究其原因: 碱化水稻秸秆在充填体基体内部能够传递荷载, 当其在基体中拔出时吸收能量, 减缓能量释放, 提高了充填体的变形能力; 同时, 未被水泥尾砂填充的碱化水稻秸秆内部的孔洞也是应变增加的影响因素。此外, 当应力达到峰值后, 碱化水稻秸秆对块体施加的拉力, 促使充填体的承载能力下降速度减慢, 故掺碱化水稻秸秆的充填体应力应变曲线饱满, 应变值更大。

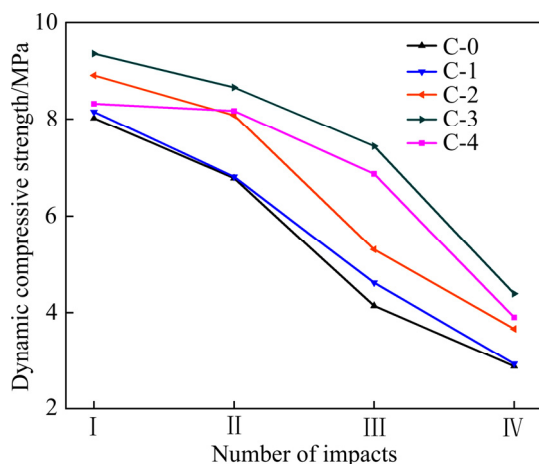


图 8 动态抗压强度与冲击次数的关系曲线

Fig. 8 Relation curve between dynamic compressive strength and number of impacts

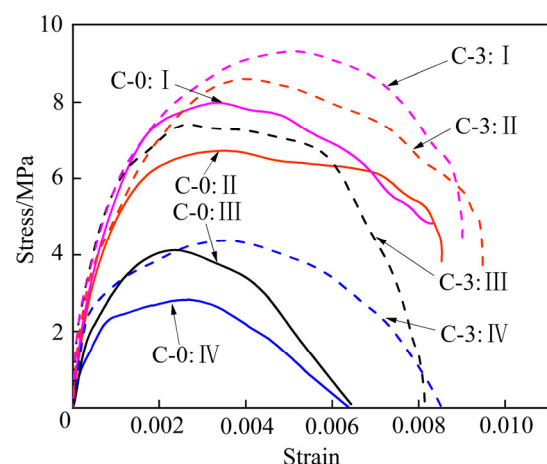


图 9 不同碱化水稻秸秆含量的充填体应力-应变曲线

Fig. 9 Stress strain curve of backfill under different number of impacts

2.2.3 循环冲击荷载下不同碱化水稻秸秆含量的充填体破坏形态

以 C-0 与 C-3 组充填体为研究对象, 分析在不同冲击次数下充填体的破坏形态, 试图进一步确定碱化水稻秸秆对充填体动态力学特征的影响。图 10 所示为 C-0 与 C-3 组充填体试样在循环冲击荷载下的破坏形态演化图。由图可知: 1) 从整体来看, 掺与未掺碱化水稻秸秆的充填体试样在循环冲击下破坏形态宏观演化过程为: 微裂纹、微裂隙萌生, 伴随较小面积表面脱落(第 I 次冲击)—微裂纹、微裂隙扩展, 加宽, 伴随表面脱落面积增加(第 II 次冲击)—裂纹继续扩展, 逐渐贯穿整个试样, 伴随表面脱落面积继续增加(第 III 次冲击)—充填体试样发生碎裂破坏(第 IV 次冲击)。(2) 在相同冲击次数下, 掺与未掺碱化水稻秸秆的充填体试样破坏形态存在差异。第 I 次冲击时, 两组充填体试样均出现微裂纹(C-3 组试样边缘出现小面积脱落), 两组充填体试样完整性较好, 损伤较小; 第 II 次冲击时, 裂纹发育, 边缘出现脱落, 但是 C-0 组充填体试样裂纹加宽、发育较严重, 相对承载能力降低, 损伤增加, 这与 2.2.1 节动态抗压强度、2.2.2 节应力应变曲线变化一致。第 III 次冲击时, C-0 组充填体试样被倾斜主裂纹贯穿, 虽未发生脱落, 但几乎失去了承载能力; 而 C-3 组充填体试样除表面大面积脱落外, 裂纹并未贯穿, 仍具有一定的承载能力。第 IV 次冲击时, 充填体试样发生碎裂破坏, C-3 组充填体

试样破碎程度更低(体现了碱化水稻秸秆的桥连作用), 表明在前 III 次冲击作用下, 掺碱化水稻秸秆的充填体试样裂纹扩展程度较差, 累积损伤更低, 具有更高的承载能力(体现了碱化水稻秸秆抑制裂纹传播的能力), 这与 2.2.1 节相同冲击次数下掺碱化水稻秸秆的充填体具有更高的动态抗压强度相对应。综上, 由此推断, 在不致使发生宏观破坏的冲击荷载下, 实际充填作业中掺碱化水稻秸秆的充填体在后续经历多次震动后更能保持较高的稳定性, 具有较高的抗冲击性能, 进而有助于提高井下作业的安全性。

3 碱化水稻秸秆与充填体基体的微观作用关系

为了确定碱化水稻秸秆与充填体基体的作用关系, 揭示冲击荷载下充填体的作用机理, 利用 SEM-EDS 获取了 C-3 组充填体的微观形貌, 如图 11 所示。由图 11(a)与 EDS 分析结果可知, 碱化水稻秸秆表面被水泥水化产物覆盖(主要为 C-S-H 凝胶与 CH), 提高了碱化水稻秸秆与充填体基体之间的粘结强度, 进而增强了碱化水稻秸秆在充填体基体内部的桥连作用。因此, 碱化水稻秸秆能够抑制裂纹的扩展, 为预脱落的块体提供拉力, 提高了充填体的动态抗压强度与抗冲击性能, 与第 2 节中掺碱化水稻秸秆的尾砂胶结充填体具有更高的动态

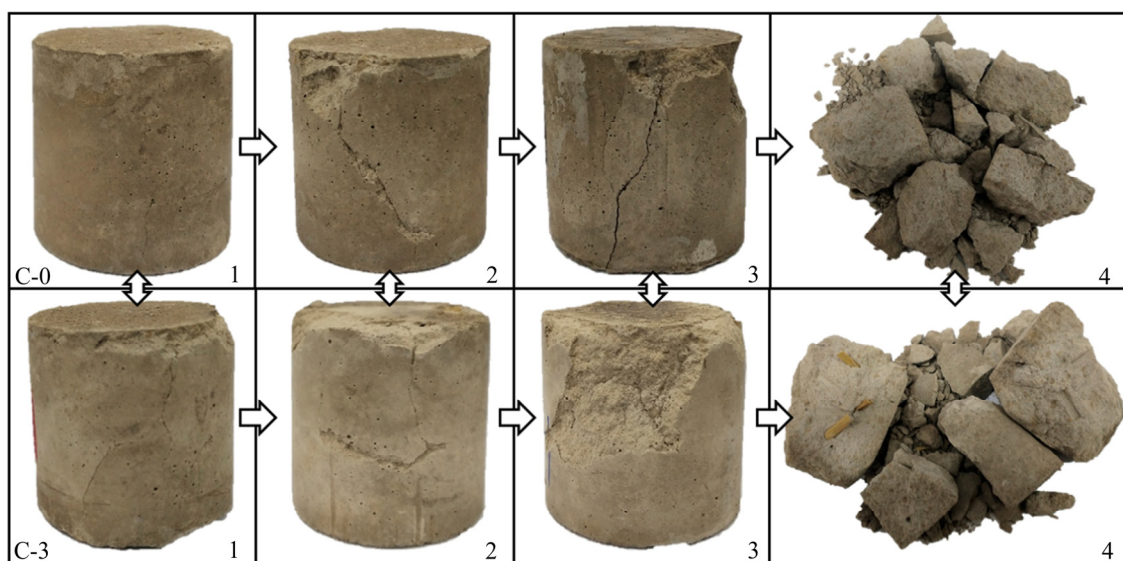


图 10 循环冲击荷载下不同碱化水稻秸秆含量的充填体破坏形态

Fig. 10 Failure morphology of backfill with different content of alkalinized rice straw under cyclic impact load

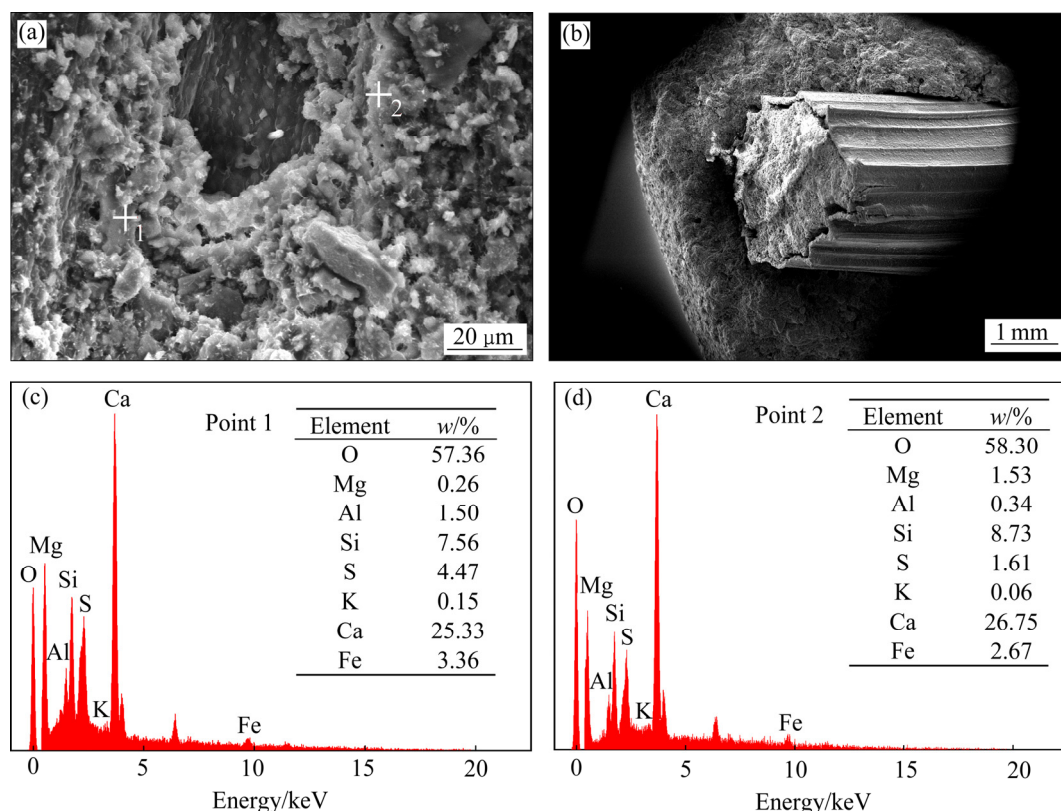


图 11 碱化水稻秸秆与充填体基体的微观形貌图

Fig. 11 Microscopic morphology of alkalinized rice straw and backfill matrix

抗压强度(单次与循环冲击)与更高的稳定性、完整性相对应。而图 11(a)中碱化水稻秸秆粗糙的纹路有助于增加其与表面水化产物的摩擦力, 进一步增加碱化水稻秸秆与基体的粘结强度。由图 11(b)可知, 碱化水稻秸秆嵌入充填体基体内部, 碱化水稻秸秆内部被水泥尾砂颗粒填充, 但是碱化水稻秸秆内部与水泥尾砂颗粒交界处存在一些孔洞, 当充填体承受外部冲击荷载时, 孔洞闭合, 导致添加碱化水稻秸秆的充填体的应变增加(与 2.1.3 与 2.2.2 节应力-应变曲线变化相对应)。

4 结论

1) 单次冲击荷载下, 随应变率增加, 所有充填体均表现出明显的应变率增强效应。在试验平均应变率范围内, 掺碱化水稻秸秆的充填体动态抗压强度显著更高。随着碱化水稻秸秆含量增加, 动态抗压强度先增加再减小, 在 0.3% 含量处存在最大值, 增幅为 14.06%~26.81%。

2) 单次冲击荷载下, 水稻秸秆掺量为 0.3% 的充填体试样的应变大于未掺水稻秸秆的充填体试样。随着应变率增加, 充填体的破坏程度加剧, 而 C-3 组充填体试样破坏程度相对较小, 碱化水稻秸秆有利于提高充填体在外部荷载作用下的完整性。

3) 循环冲击荷载下, 随着冲击次数增加, 动态抗压强度逐渐减小, 所有充填体试样均在第四次冲击时发生碎裂破坏。在相同冲击次数时, 掺碱化水稻秸秆的充填体试样动态抗压强度更大, 尤其是碱化水稻秸秆含量为 0.3% 时动态抗压强度最大, 相比未掺碱化水稻秸秆的充填体, 动态抗压强度增幅为 16.7%~79.7%。

4) 循环冲击荷载作用下, 所有充填体试样的应力-应变曲线与单次冲击荷载相似, 主要经历微裂隙闭合阶段、弹性变形阶段、非弹性变形阶段、裂纹贯通与破坏阶段。此外, 在前 III 次冲击中, 掺碱化水稻秸秆的充填体试样具有更高的稳定性。在不致使发生宏观破坏的循环冲击荷载下, 碱化水稻秸秆提高了充填体的稳定性。

5) 微观形貌显示碱化水稻秸秆表面被水泥水化产物覆盖, 提高了其与充填体基体的粘结强度, 增强了碱化水稻秸秆在充填体基体内部的桥连作用, 并抑制裂纹的扩展, 为块体提供拉力, 进而改善了充填体的动态力学特征。

REFERENCES

- [1] XU W B, LI Q L, ZHANG Y L. Influence of temperature on compressive strength, microstructure properties and failure pattern of fiber-reinforced cemented tailings backfill[J]. Construction and Building Materials, 2019, 776–785.
- [2] BELEM T, BENZAAZOUA M. Design and application of underground mine paste backfill technology[J]. Geotech Geol Eng, 2008, 26 (2): 147–174.
- [3] CAO S, YILMAZ E, SONG W D. Evaluation of viscosity, strength and microstructural properties of cemented tailings backfill[J]. Minerals, 2018, 8(8): 352.
- [4] ANDREW J B, FALL M. Curing temperature dependency of the release of arsenic from cemented paste backfill made with Portland cement[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 269: 110772.
- [5] LIU Y, LI H, WANG K, et al. Effects of accelerator–water reducer admixture on performance of cemented paste backfill[J]. Construction and Building Materials, 2020, 242: 118187.
- [6] YILMAZ E, BELEM T, BENZAAZOUA M. Effects of curing and stress conditions on hydromechanical, geotechnical and geochemical properties of cemented paste backfill[J]. Engineering Geology, 2014, 168: 23–37.
- [7] 王新明, 古德生, 张钦礼. 深井矿山充填理论与管道输送技术[M]. 长沙: 中南大学出版社. 2010.
WANG Xin-min, GU De-sheng, ZHANG Qin-li. Theory of backfilling activity and pipeline transportation technology of backfill in deep mines[M]. Changsha: Central South University Press, 2010.
- [8] XU W B, ZHANG Y L, LIU B. Influence of silica fume and low curing temperature on mechanical property of cemented paste backfill[J]. Construction and Building Materials, 2020, 254: 119305.
- [9] 谭玉叶, 汪杰, 宋卫东, 等. 循环冲击下胶结充填体动载力学特性试验研究[J]. 采矿与安全工程学报. 2019, 36(1): 184–190.
- TAN Yu-ye, WANG Jie, SONG Wei-dong, et al. Experimental study on mechanical properties of cemented tailings backfill under cycle dynamic loading test[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(1): 184–190.
- [10] 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: 1608–1617.
- [11] 严成, 欧卓成, 段卓平. 脆性材料动态强度应变率效应[J]. 爆炸与冲击, 2011, 31(4): 423–427.
YAN Cheng, OU Zhuo-cheng, DUAN Zhuo-ping. Strain-rate effects on dynamic strength of brittle materials[J]. Explosion and Shock Waves, 2011, 31(4): 423–427.
- [12] CAO S, XUE G L, SONG W D, et al. Strain rate effect on dynamic mechanical properties and microstructure of cemented tailings composites[J]. Construction and Building Materials, 2020, 247: 118537.
- [13] LIU B, GAO Y T, JIN A B, et al. Dynamic characteristics of superfine tailings-blast furnace slag backfill featuring filling surface[J]. Construction and Building Materials, 2020, 242: 118173.
- [14] CAO S, YILMAZ E Y, SONG W D. Dynamic response of cement-tailings matrix composites under SHPB compression load[J]. Construction and Building Materials, 2018, 186: 892–903.
- [15] 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): 157–161.
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): 157–161.
- [16] HUANG S, XIA K W, QIAO L. Dynamic tests of cemented paste backfill: effects of strain rate, curing time, and cement content on compressive strength[J]. Journal of Materials Ence, 2011, 46(15): 5165–5170.
- [17] XUE G L, YILMAZ E, SONG W D, et al. Influence of fiber reinforcement on mechanical behavior and microstructural properties of cemented tailings backfill[J]. Construction and Building Materials, 2019, 213: 275–285.
- [18] OUATTARA D, BELEM T, MBONIMPA M, et al. Effect of

- superplasticizers on the consistency and unconfined compressive strength of cemented paste backfills[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 18(30): 59–72.
- [19] YANG L, YILMAZ E, LI J W, et al. Effect of superplasticizer type and dosage on fluidity and strength behavior of cemented tailings backfill with different solid contents[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 187(30): 290–298.
- [20] HARUNA S, FALL M. Enhanced flow ability and mechanical characteristics of cemented paste backfill with a chemical admixture[C]// *Proceedings of the 12th International Symposium on Mining with Backfill, Minefill*, 2017.
- [21] CAO S, YILMAZ E, SONG W D. Fiber type effect on strength, toughness and microstructure of early age cemented tailings backfill[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 223: 44–54.
- [22] CHEN X, SHI X Z, ZHOU J, et al. Compressive behavior and microstructural properties of tailings polypropylene fibre-reinforced cemented paste backfill[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 190: 211–221.
- [23] XU W B, LI Q L, ZHANG Y L. Influence of temperature on compressive strength, microstructure properties and failure pattern of fiber-reinforced cemented tailings backfill[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 222: 776–785.
- [24] XIE X, ZHOU Z, JIANG M, et al. Cellulosic fibers from rice straw and bamboo used as reinforcement of cement-based composites for remarkably improving mechanical properties[J]. *Composites Part B*. 2015, 78: 153–161.
- [25] 张学元, 吕 春, 张道明, 等. 稻草纤维在轻骨料混凝土中的增韧性能及劈裂抗拉强度预测模型[J]. *材料导报*, 2020, 34(2): 34–38.
- ZHANG Xue-yuan, LÜ Chun, ZHANG Dao-ming, et al. Performance of increasing toughness of straw fiber in lightweight aggregate concrete and its prediction model of splitting tensile strength[J]. *Materials Reports*, 2020, 34(2): 34–38.
- [26] SATHIPARAN N, ZOYSA H T S M D. The effects of using agricultural waste as partial substitute for sand in cement blocks[J]. *Journal of Building Engineering*, 2018, 19: 216–227.
- [27] WANG S, SONG X P, CHEN Q S, et al. Mechanical properties of cemented tailings backfill containing alkalized rice straw of various lengths[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 276: 111124.
- [28] CHEN X, SHI X Z, ZHOU J, et al. Determination of mechanical, flowability, and microstructural properties of cemented tailings backfill containing rice straw[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 246: 118520.
- [29] 王晓燕, 胡晨光, 封孝信. 改性小麦秸秆/水泥复合材料的强度[J]. *材料科学与工程学报*, 2017, 35(1): 140–143.
- WANG Xiao-yan, HU Chen-guang, FENG Xiao-xin. Strength of modified wheat straw/cement composites[J]. *Journal of Materials Science & Engineering*, 2017, 35(1): 140–143.
- [30] 樊 华, 盛 莉. 秸秆纤维水泥基材料的性能试验研究[J]. *安徽农业大学学报*, 2011, 38(4): 643–646.
- FAN Hua, SHENG Li. Experimental studies on performance of cement-based straw fiber material[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2011, 38(4): 643–646.
- [31] 梁宁慧, 杨 鹏, 刘新荣, 等. 高应变率下多尺寸聚丙烯纤维混凝土动态压缩力学性能研究[J]. *材料导报*, 2018, 32(2): 288–294.
- LIANG Ning-hui, YANG Peng, LIU Xin-rong, et al. A study on dynamic compressive mechanical properties of multi-size polypropylene fiber concrete under high strainrate[J]. *Materials Reports*, 2018, 32(2): 288–294.
- [32] 侯永强, 尹升华, 杨世兴, 等. 冲击荷载下胶结充填体的力学性能及能耗特征[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(8): 2–7.
- HOU Yong-qiang, YIN Sheng-hua, YANG Shi-xing, LIU Hong-bin. Mechanical properties and energy consumption characteristics of cemented backfill under impact load[J]. *J Huazhong Univ of Sci & Tech (Natural Science Edition)*, 2020, 48(8): 2–7.

Response of dynamic mechanical properties of alkali rice straw based cemented tailings backfill under SHPB impact load

SONG Xue-peng¹, WANG Shi¹, WEI Mei-liang¹, LIU Wu¹, WANG Xiao-jun¹, TAO Tie-jun², WANG Jie³

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China;

2. College of Civil Engineering Guizhou University, Guiyang 550025, China;

3. School of Architectural and Surveying & Mapping Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract: In the process of backfill mining, the backfill inevitably experiences dynamic disturbance such as excavation and blasting, which reduces the stability of the backfill. Therefore, the low-cost and widely-sourced agricultural waste rice straw was added to the cemented tailings backfill, and the dynamic mechanical characteristics of the backfill with different contents of alkalized rice straw (alkalized by NaOH solution) under uniaxial single and cyclic impact loads were studied by using split Hopkinson pressure bar (SHPB). The results showed that: i) under single impact load, the strain rate enhancement effect of all the backfill was obvious, and the dynamic compressive strength of the backfill was significantly improved due to the addition of alkalized rice straw. With alkalized rice straw content increased from 0 to 0.4%, the dynamic compressive strength of the backfill first increased and then decreased. The dynamic compressive strength of backfill increased by 14.06%–26.81%, and the optimal addition amount of alkalized rice straw was 0.3%. ii) The strain of the backfill with alkalized rice straw was greater. With the average strain rate increased, the damage degree of the backfill gradually intensified, but the addition of alkalized rice straw could maintain the stability of the backfill, and the block was larger when the final fragmentation failure occurs. iii) Under the cyclic impact load of the same number of impacts, the dynamic compressive strength of the backfill with alkalized rice straw was greater, and the optimal addition amount of alkalized rice straw was still 0.3%. iv) The surface of the alkalized rice straw was covered by cement hydration products, which improved the adhesive strength between the alkalized rice straw and the backfill matrix. The alkalized rice straw played a bridging role in the backfill, which inhibited the expansion of cracks, and provided tension for the pre detached block, thus the dynamic mechanical characteristics of the backfill was improved. The stability and impact resistance of the backfill are significantly improved by alkalized rice straw, which is more conducive to improving the safety of underground operation.

Key words: Alkalized rice straw; impact load; cemented tailings backfill; dynamic compressive strength; SHPB

Foundation item: Projects(51804134, 51804135) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project(20181BAB216013) supported by the Natural Science Foundation of Jiangxi Province, China; Project(JXUSTQJYX2019007) supported by Program of Qingjiang Excellent Young Talents, Jiangxi University of Science and Technology

Received date: 2020-10-23; **Accepted date:** 2021-02-28

Corresponding author: WANG Shi; Tel: +86-15570073478; E-mail: sxp9612@126.com

(编辑)