

碱渣改性尾砂胶结充填体的动力学特性及能量特征

贾石磊¹, 张 坤²

(1.冀中能源峰峰集团武安市南洺河铁矿有限公司, 河北 邯郸 056300; 2.华北理工大学 矿业工程学院, 河北 唐山 063210)

摘要: 碱渣作为具有潜在胶凝特性的固体废弃物, 大量堆积会严重污染环境。为大规模利用碱渣, 本研究采用碱渣取代部分水泥制备碱渣改性尾砂胶结充填体, 对碱渣-水泥基尾砂胶结充填体进行冲击试验, 探究碱渣改性尾砂胶结充填体的力学性能和能量特征。结果表明: 碱渣改变了充填体的力学性能, 提高了充填体的抗压强度。随着碱渣取代率的增加, 碱渣改性尾砂胶结充填体的抗压强度先增加后减小, 在碱渣取代率为5%时最高。碱渣改性尾砂胶结充填体的能量特征主要分为线弹性阶段、塑性屈服阶段和失稳破坏增长阶段3个阶段。碱渣使得第一阶段的弹性应变能更加趋近于总能量, 耗散能为负的现象减少, 能量曲线更趋近于真实状态。随着碱渣的加入, 充填体的弹性应变能最大值先增加后减小, 在碱渣取代率为5%时达到最大, 这表明碱渣改善了充填体的力学性能, 为碱渣在矿山上的应用奠定了理论基础。

关键词: 碱渣取代率; 冲击载荷; 能量特征; 力学性能; 动态抗压强度

doi: 10.3969/j.issn.1009-3842.2026.04.008

中图分类号: TD853 文献标识码: A 文章编号: 1009-3842(2026)04-0063-06

尾砂胶结充填法是矿山常用的充填方法, 它将水泥、尾砂和水混合在一起形成充填体, 具有一定的强度^[1]。随着矿山安全标准的提高, 对充填体的强度要求也越来越高。大部分矿山通过增加水泥用量、改变灰砂比来提高充填体的强度, 这一方式增加了矿山充填的经济成本^[2-4]。为降低生产成本, 研究人员进行了大量试验, 通过用固体废弃物代替部分水泥, 降低了经济成本, 提高了充填体强度^[5-6]。

碱渣是可参与水泥水化反应的固体废弃物, 大量堆积会严重污染环境^[7-9]。研究表明, 每生产1 t纯碱大约会产生0.3~0.6 t碱渣, 且中国每年产生的碱渣排放量超过400万 t^[10-11]。孙海宽等^[12]对碱渣改性充填体的早期力学特性进行了研究, 结果表明: 加入碱渣制备的碱渣改性尾砂胶结充填体, 其抗压强度得到提升, 力学性能显著改善。李运红等^[13]研究了全固废流态化材料的充填性能, 结果表明: 加入碱渣可以增强充填体的强度。徐赛赛等^[14]研究了碱渣掺量对胶凝材料性能的影响, 结果表明: 适量碱渣掺量可以改善胶凝材料的力学性能。以上都是对碱渣充填体的静态抗压强度进行的研究, 侯永强等^[15]研究了早期充填体在冲击载荷下的力学特性,

探讨了其能量和应变率的关系。谭玉叶等^[16]研究了循环冲击下充填体的力学特征, 比较了单次与循环冲击下的不同结果。目前对尾砂胶结充填体力学性能的研究已涉及多种材料, 但碱渣改性尾砂胶结充填体的力学特征尚未被充分揭示。

本研究采用碱渣、水泥和水混合制备碱渣改性尾砂胶结充填体, 以碱渣取代率和平均应变率为变量, 探究其力学特性。结合应力-应变曲线, 探究碱渣添加量对充填体的能量演化特征的影响。通过扫描电子显微镜(SEM), 探究碱渣改性尾砂胶结充填体的微观形貌特征。这为碱渣的大规模应用提供了一定的理论依据。

1 试验

1.1 试验材料

本研究采用的水泥是P.C 42.5R水泥, 尾砂为铁尾砂, 碱渣是河北某碱厂的碱渣。

碱渣和水泥的粒度分析如图1所示。碱渣的粒径分布比较集中, 水泥的粒径分布范围相对较宽, 但两者的主要粒径集中区间相近, 表明碱渣与水泥的物理特性相似, 因而具有一定的辅助胶凝

收稿日期: 2026-05-12; 修订日期: 2026-06-12

基金项目: 河北省自然科学基金资助项目(E2024209086); 唐山市科技计划项目(24130211C)

作者简介: 贾石磊(1997—), 男, 河北邢台人, 助理工程师, 本科, 研究方向: 充填采矿, E-mail: 1391591112@qq.com

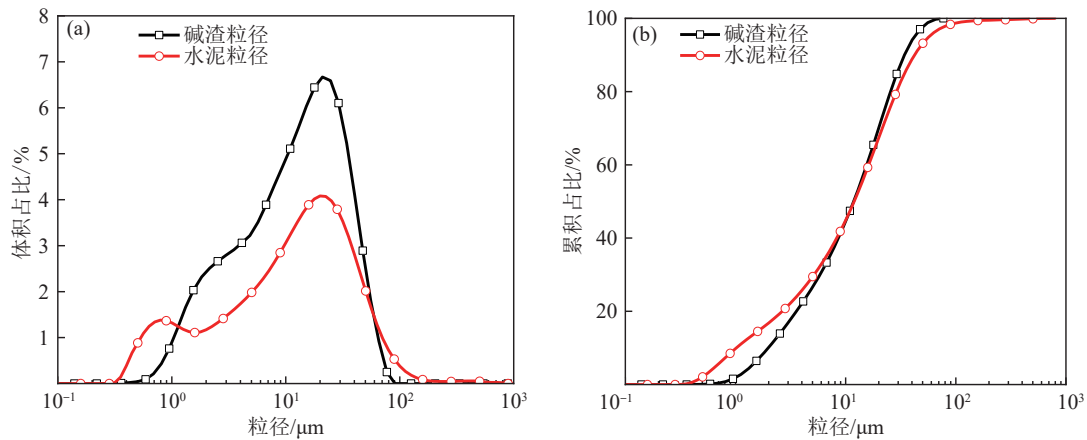


图1 水泥和碱渣的粒径分析图:(a)体积粒径占比;(b)累积粒径占比

Fig. 1 Particle size analysis diagram of cement and alkali residue: (a) Volume fraction; (b) Cumulative volume fraction

作用。

粒径的计算公式如式(1)所示。

$$\begin{cases} C_c = \frac{d_{30} \times d_{30}}{d_{10} \times d_{60}} \\ C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \end{cases}$$

式(1)

式中: C_c 为曲率系数, C_u 为不均匀系数, d_{30} 为累计质量占比达到30%时的粒径, d_{10} 为累计质量占比达到10%时的粒径, d_{60} 为累计质量占比达到60%时的粒径^[17]。

经计算可得: 水泥的曲率系数为1.562, 大于1且小于3; 不均匀系数为10.383, 大于5。碱渣的曲率系数为1.64, 大于1且小于3; 不均匀系数为7.576, 大于5。碱渣和水泥的级配良好, 且碱渣的不均匀系数低于水泥, 粒度分布更集中^[18]。

1.2 试验方案

碱渣改性尾砂胶结充填体的试验方案如图2所示。采用自制板柱模具, 经过配料、搅拌、浇筑、刮平、脱模等工序, 制备直径为50 mm、高为25 mm的样品。其中, 搅拌操作使用UJZ-15型砂浆搅拌机搅拌10 min, 随后将配制好的碱渣改性尾砂胶结充填体(LMCTB)样品保存在养护箱内[温度: (20±2)℃; 相对湿度: 95%]^[19]。在经过一定时间养护后, 测量样品的尺寸、波速和质量, 最后进行冲击试验。

经过预实验制备了质量分数分别为68%、70%和72%的试样。对比发现, 质量分数为70%的试样更加接近于膏体状态, 因此选择70%作为试样浓度。样品的灰砂比为1:4, 碱渣取代率(等质量取代水泥)分别

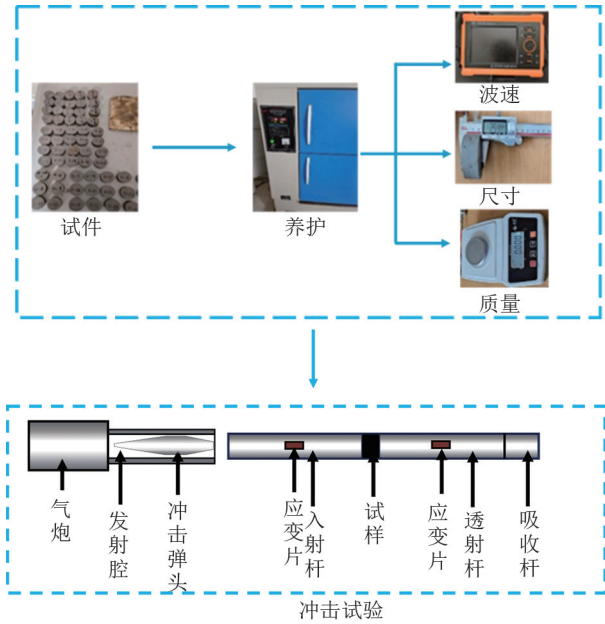


图2 测试方案

Fig. 2 Test scheme

为0%、5%和10%。养护龄期为14 d^[20], 然后进行平均应变率的选择, 确定平均应变率分别为40、55、70 s⁻¹。

1.3 测试方法

冲击试验在华北理工大学冲击试验室进行, 如图2所示, 分离式霍普金森压杆试验系统由气炮、发射腔、冲击弹头、入射杆、反射杆、透射杆、试样和应变片组成。此外, 还需连接示波器、电脑和动态应变分析仪等。第一步为空测试验, 检查试验装置是否可以正常使用。空测试验结果如图3所示, 入射赋值和反射赋值相等, 且透射赋值为0时, 表明分离式霍普金森压杆试验装置正常, 可以开始正式试验。

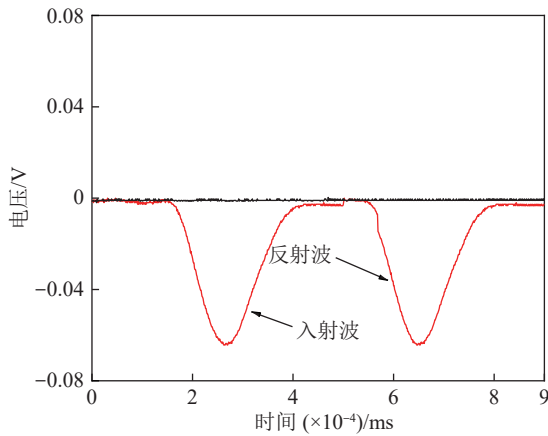


图3 空冲的原始波形图

Fig. 3 Original waveform diagram of as-built test

2 结果与分析

2.1 应力-应变曲线

图4为不同碱渣取代率下的应力-应变曲线。

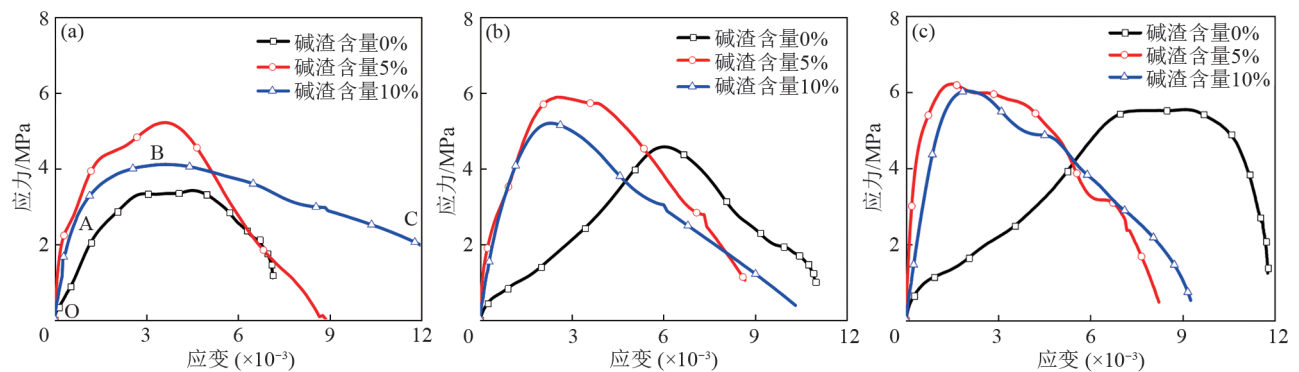
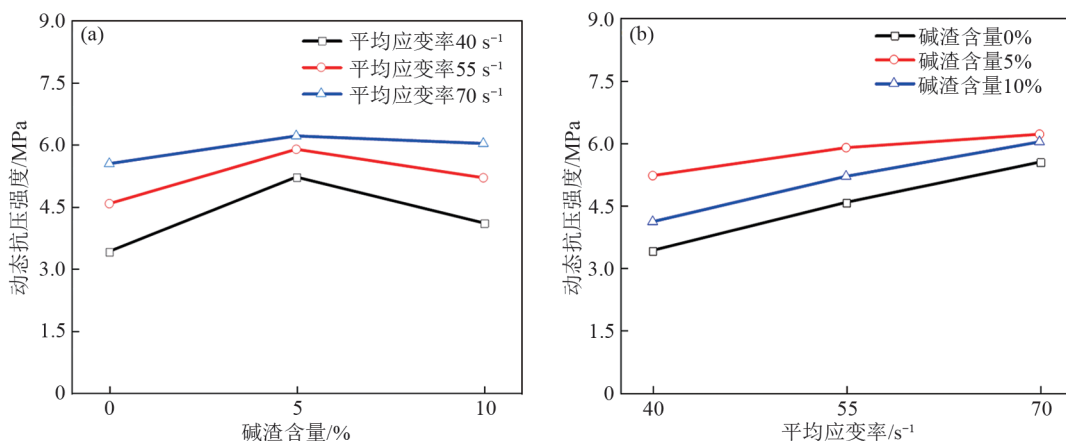
图4 应力应变曲线: (a) 平均应变率 40 s^{-1} ; (b) 平均应变率 55 s^{-1} ; (c) 平均应变率 70 s^{-1} Fig. 4 Stress-strain curves under average strain rate of (a) 40 s^{-1} , (b) 55 s^{-1} , and (c) 70 s^{-1} 

图5 碱渣取代率和平均应变率对动态抗压强度的影响: (a) 碱渣取代率对动态抗压强度的影响;

(b) 平均应变率对动态抗压强度的影响

Fig. 5 Influence of (a) alkali residue substitution rate and (b) average strain rate on dynamic compressive strength

以图4(a)中碱渣取代率10%为例,碱渣改性尾砂胶结充填体的应力-应变过程分为三个阶段。第一阶段(OA)为线弹性阶段,在此阶段应力增长迅速,随着应变的增加,应力随应变线性增加,应力-应变曲线的斜率为弹性模量。第二阶段(AB)为塑性屈服阶段,在此阶段试样内部出现裂纹,随着应变的增加,应力增长率下降,但应力逐渐增大直至峰值应力。第三阶段(BC)为破坏阶段,试样内部裂纹扩展,随着应变的增加应力快速下降。随着碱渣取代率的增大,峰值应力先增加后减小。

2.2 碱渣改性尾砂胶结充填体的动态抗压强度

不同碱渣取代率下充填体的动态抗压强度如图5(a)所示。随着碱渣取代率的增加,碱渣改性尾砂胶结充填体的动态抗压强度呈现先增大后减小的趋势,在碱渣取代率为5%时最大,碱渣取代率为10%时的强度仍高于0%。在碱渣取代率为5%时,

不同平均应变率下的动态抗压强度差值较小。这说明碱渣的加入增强了其动态抗压强度,改善了其力学特性。当碱渣取代率为10%时,碱渣的消耗量最大,最适合碱渣的回收利用。

平均应变率对碱渣改性尾砂胶结充填体动态抗压强度的影响规律如图5(b)所示。随着平均应变率的增加,碱渣改性尾砂胶结充填体的动态抗压强度逐渐增大,但增长速率逐渐降低,在 70 s^{-1} 时增幅最大。

2.3 碱渣改性尾砂胶结充填体的能量特征

结合碱渣改性尾砂胶结充填体的应力-应变曲线,对碱渣改性尾砂胶结充填体的应变能进行分析。碱渣改性尾砂胶结充填体在动态冲击状态下的总能量、弹性应变能和耗散能按式(2)计算。

$$\begin{cases} U = \int_0^{\varepsilon_e} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \\ U_e = \frac{1}{2} \sigma \cdot \varepsilon_0 = \frac{\sigma^2}{2E_e} \\ U_d = U - U_e \end{cases} \quad \text{式(2)}$$

式中: ε_e 为极限应变, ε_0 为弹性应变, U 为总能量,

U_e 为弹性应变能, U_d 为耗散能, E_e 为初始弹性模量。

根据式(2)计算出碱渣改性尾砂胶结充填体的能量,结果如图6所示。由图6可知,随着碱渣取代率的增加,总能量、最大弹性应变能和耗散能先增大后减小,在碱渣取代率为5%时达到最高。

碱渣改性尾砂胶结充填体的能量特征演化过程分为三个阶段。第一阶段为线弹性阶段,在此阶段弹性应变能增长迅速,占据主导地位。第二阶段为塑性屈服阶段,在此阶段,碱渣改性尾砂胶结充填体的内部逐渐产生新的裂纹,出现不可恢复的变形。弹性应变能增长缓慢,逐渐达到最大值,总能量和耗散能快速增长,弹性应变能占比降低,但仍占主导地位。第三阶段为失稳破坏阶段,在此阶段试样内部出现损伤,弹性应变能下降,耗散能快速增加,该阶段能量主要以耗散能的形式被释放出去。

图6表明,弹性应变能的最大值随着碱渣取代率的增加呈先增大后减小的趋势,说明随着碱渣取代率的增加,碱渣改性尾砂胶结充填体的储能极限先增加后减小,这与应力-应变结果一致。

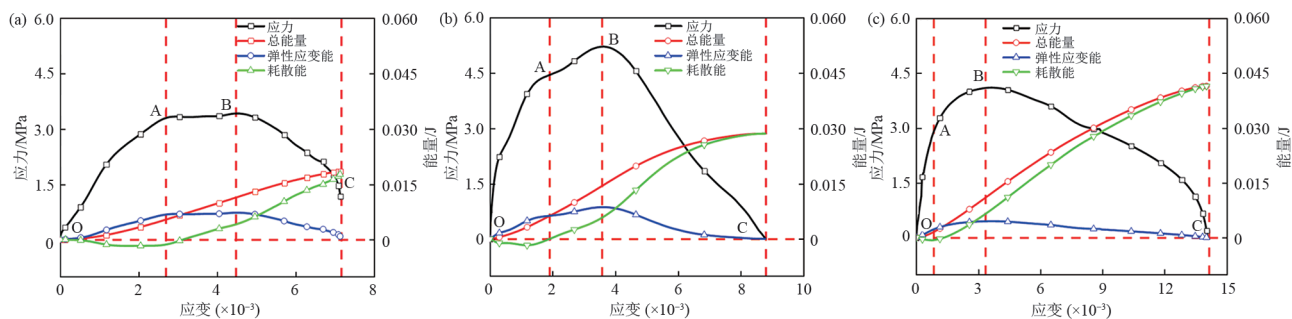


图6 碱渣改性尾砂胶结充填体的能量特征:(a)碱渣取代率0%;(b)碱渣取代率5%;(c)碱渣取代率10%

Fig. 6 Energy evolution of alkali residue modified cemented tailings backfill with different alkali residue substitution rate:

(a) 0%; (b) 5%; (c) 10%

2.4 碱渣改性尾砂胶结充填体的微观形貌分析

碱渣改性尾砂胶结充填体不同区域的SEM图像如图7所示。其中图7(a)和图7(b)分别对应样品的左边和右边区域。通过能谱分析可得其水化产物中含有大量的C-S-H凝胶和针棒状的钙矾石。钙矾石之间相互交叉,作为主要支撑骨架,形成空间网状结构,可以提高充填体强度。在充填体中,水泥水化反应产生了游离的 Ca^{2+} 和弱碱性环境,为钙矾石的生长

提供了有利的条件,从而显著提高充填体的强度。

3 结论

通过冲击试验装置,对碱渣应用于充填体的可能性进行了分析,主要结论为:

1) 随着碱渣的不断加入,碱渣改性尾砂胶结充填体动力学性质得到改善。随着碱渣取代率的增加,碱渣改性尾砂胶结充填体的抗压强度呈现先增大后减小的趋势,在碱渣取代率为5%时达到最高值。

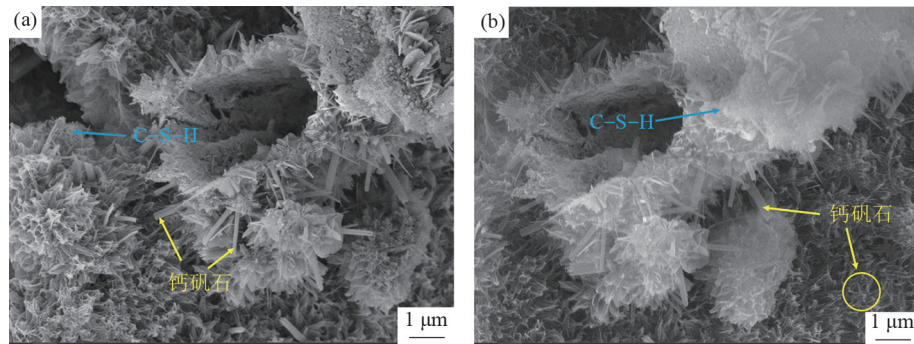


图7 碱渣改性尾砂胶结充填体的微观形貌: (a) 左边区域; (b) 右边区域

Fig. 7 Microscopic morphology of alkali residue modified cemented tailings backfill: (a) Left region; (b) Right region

随着平均应变率的增加,碱渣改性尾砂胶结充填体抗压强度逐渐增大,但增长速率逐渐降低。

2)碱渣改性尾砂胶结充填体的能量特征主要分为三个阶段。随着碱渣取代率的增加,其弹性应变能最大值先增大后减小,碱渣取代率为5%时最大,碱渣的加入改善了其力学特性,增加了其强度。

3)加入碱渣后充填体生成了大量的C-S-H凝胶和针棒状的钙矾石,提高了充填体的强度。碱渣作为充填材料的添加剂具有一定的可行性,碱渣取代部分水泥后,可以有效地改善充填体的力学特性,提高充填体的动态抗压强度,同时实现碱渣的回收利用,降低矿山的充填成本,进而促进矿山资源的可持续发展。

参考文献:

- [1] 张海磊,王序威,张亨,等.高地压软岩矿山残矿回采技术研究[J].中国矿业,2020,29(增刊2):292-296.
- [2] 何磊,马维清,焦志慧,等.极细高硫尾砂胶结充填料配比优化实验研究[J].中国矿业,2022,31(增刊1):388-391.
- [3] 贾世杰,徐洪艳,陈辉.粉煤灰-水泥基胶结充填体早期强度及水化机理研究[J].采矿技术,2021,21(3):164-167,183.
- [4] 黄璐,乔登攀.分级尾砂胶结充填体强度参数试验研究[J].黄金,2016,37(4):30-33.
- [5] 尹韶宁,袁鹏,潘栋,等.固废基充填胶凝材料配比优化与性能研究[J/OL].铜业工程,2026-5-12. <http://link.cnki.net/urlid/36.1237.TF.20260503.2209.002>.
- [6] 刘殿华,曹易恒,姜凡均.细粒级尾砂流失前后充填材料试验对比研究[J].铜业工程,2022(1):21-26.
- [7] 李志全,张广田,张艳佳,等.碱渣掺量对固废基胶凝材料性能的影响[J].硅酸盐通报,2025,44(7):2597-2607.
- [8] 赵晓晴,蒋成,黄勃,等.碱渣-粉煤灰稳定土力学性能研究[J].硅酸盐通报,2025,44(4):1504-1512.
- [9] 徐赛赛,延立强,武少弟,等.碱渣微观结构及氯离子溶出的研究[J].纯碱工业,2025(1):36-39.
- [10] 王正成,刘松玉,郭远臣,等.碱渣基本性质及工程应用研究进展[J].工程科学学报,2025,47(11):2343-2360.
- [11] 邵勇,刘小丽,朱进军.碱渣改良海相软土试验研究[J].水力发电,2019,45(5):120-124.
- [12] 孙海宽,甘德清,薛振林,等.碱渣改性充填体早期力学特性及能量演化特征[J].材料导报,2024,38(9):136-142.
- [13] 李运红,王光炎,乔森,等.全固废流态化材料充填性能研究[J].人民长江,2024,55(增刊2):257-262.
- [14] 徐赛赛,杨全,魏建君,等.碱渣掺量对胶凝材料性能的研究[J].纯碱工业,2024(5):13-16.
- [15] 侯永强,尹升华,杨世兴,等.冲击荷载作用下全尾砂胶结充填体的能耗特征与损伤特性[J].中国有色金属学报,2021,31(6):1661-1671.
- [16] 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):184-190,197.
- [17] Xue Z L, Zhang K, Zhang Y Z, et al. Mechanical properties and damage evolution of lithium slag modified cemented tailings backfill under impact load[J]. Construction and Building Materials, 2025, 472: 140925.
- [18] 薛振林,张坤,张友志,等.冲击荷载下锂渣-水泥-尾砂胶结充填体的力学性能及损伤本构模型[J].岩石力学与工程学报,2025,44(11):2920-2930.
- [19] 张振平,刘经民,陈智宏,等.某矿细粒级全尾砂充填材料性能研究及配比优化[J].铜业工程,2024(5):

139-145.

[20] Yang X B, Yang J, Chen X, et al. Mechanical properties and macroscopic failure characteristics of magnesium slag-based backfill under unloading confining pressure [J]. Case Studies in Construction Materials, 2026, 24: e06079.

Dynamic Characteristics and Energy Evolution of Alkali Residue Modified Cemented Backfill

Jia Shilei¹, Zhang Kun²

(1. Jizhong Energy Fengfeng Group Wu'an Nanminghe Iron Mine Co., Ltd., Handan 056300, China; 2. College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China)

Abstract: Alkali residue, a solid waste with potential cementitious properties, poses severe environmental risks when piled in a large amount. To enable large-scale utilization of alkali residue, this study partially replaced cement with alkali residue to prepare alkali residue modified cemented backfill. Dynamic impact tests were conducted to investigate mechanical behavior and energy evolution characteristics of alkali residue modified cemented backfill. Results indicated that incorporation of alkali residue altered the mechanical performance and enhanced compressive strength of the backfill. With increasing alkali residue replacement proportion, compressive strength first increased and then decreased, peaking at an alkali residue replacement proportion of 5%. Energy evolution of alkali residue modified backfill can be categorized into three stages: linear elastic stage, plastic yield stage, and instable failure propagation stage. Addition of alkali residue brought elastic strain energy closer to total input energy during the first stage, reduced instances of negative dissipated energy, and rendered the energy curves more physically realistic. As alkali residue content increased, the maximum elastic strain energy initially rose and then declined, reaching its peak at an alkali residue replacement proportion of 5%. These findings demonstrated that alkali residue improved mechanical performance of cemented backfill, thereby providing a theoretical basis for the application of alkali residue in mine backfilling operations.

Key words: alkali residue substitution rate; impact load; energy feature; mechanical property; dynamic compressive strength

doi: 10.3969/j.issn.1009-3842.2026.04.008

引文格式: 贾石磊, 张坤. 碱渣改性尾砂胶结充填体的动力学特性及能量特征[J]. 铜业工程, 2026(4): 63-68.
Jia Shilei, Zhang Kun. Dynamic characteristics and energy evolution of alkali residue modified cemented backfill[J].
Copper Engineering, 2026(4): 63-68.

投稿网址: www.tygc.net

微信公众号: jxtygc