

温度效应下胶结充填体动态强度及能量演化特征^①

吴琼¹, 郭进平¹, 王小林¹, 张超¹, 刘非², 侯展娜¹, 李婷婷¹

(1.西安建筑科技大学 资源工程学院, 陕西 西安 710055; 2.西北有色地质矿业集团有限公司, 陕西 西安 710054)

摘要: 为分析不同温度条件下胶结充填体在动载作用下的强度变化特征,采用 SHPB 冲击试验,结合能量演化过程开展胶结充填体动态力学特性研究。结果表明:胶结充填体动态抗压强度随着养护温度提高而提高,破坏后发生明显的劈裂拉伸破坏;不同养护温度下充填体的应力应变曲线具有相似性,均可划分为似弹性阶段、塑性变形阶段、峰后破坏阶段 3 个阶段。充填体具有波阻抗效应,在近似应变率(100 s^{-1})条件下,冲击过程中 77%左右能量被反射,2%左右能量透射穿充填体。随着养护龄期及养护温度提高,充填体吸能密度和透射能均上升。微观分析结果表明,随着养护温度提高,胶结充填体内部水化反应速率提升,水化程度增加且水化产物增多,充填体内部孔隙被水化产物填充,形成更加致密的微观结构,进一步证实了养护温度的提高能促进充填体早期强度的提升。

关键词: 深部开采; 胶结充填; 冲击动载; 养护温度; 养护龄期; 动态抗压强度; 能量演化; 温度效应

中图分类号: TD853

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2025.01.005

文章编号: 0253-6099(2025)01-0027-08

Effect of Temperature on Strength and Energy Evolution Characteristics of Cemented Backfill Mass Under Dynamic Loading

WU Qiong¹, GUO Jinping¹, WANG Xiaolin¹, ZHANG Chao¹, LIU Fei², HOU Zhanna¹, LI Tingting¹

(1.School of Resources Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China; 2.Northwest Nonferrous Geological and Mining Group Limited, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: In order to analyze the strength variation characteristics of cemented backfill mass at different temperatures under dynamic loading, a SHPB impact test was performed to study the mechanical properties of cemented backfill mass under dynamic loading during the energy evolution process. The results show that the compressive strength of the cemented backfill mass under dynamic loading increases as the curing temperature rises, and presents obvious splitting tensile failure. It is also found that the stress-strain curves of backfill mass at different curing temperatures are similar, all consisting of three stages: quasi-elastic stage, plastic deformation stage and post-peak failure stage. The backfill mass experiences a wave impedance effect. At an approximate strain rate (100 s^{-1}), about 77% of the energy is reflected and about 2% of the energy is transmitted through the backfill mass during the impact process. As the curing time is prolonged and the curing temperature rises, the energy absorption density and transmissive energy of the backfill mass increase. The micro-analysis shows that with the rise of curing temperature, the internal hydration reaction of backfill mass occurs at a higher rate, leading to higher degree of hydration and more hydration products. Those hydration products gradually fill in the internal pores of backfill mass, resulting in denser microstructure. It further confirms that increasing curing temperature can improve the early strength of backfill mass.

Key words: deep mining; cemented backfill; dynamic impact load; curing temperature; curing time; compressive strength under dynamic load; energy evolution; temperature effect

随着浅部矿产资源渐趋枯竭,深部开采已成为矿业发展的必然趋势。在深部开采中,充填采矿法不仅

能实现矿山无废开采,而且能够有效回收矿柱资源、控制地表沉降与管理地压,是绿色开采的发展方向 and 必

① 收稿日期: 2024-08-14

基金项目: 陕西省自然科学基金(2024JC-YBQN-0507); 国家资助博士后研究人员计划(GZC20232063); 陕西省博士后科研项目(2023BSHYDZZ142)

作者简介: 吴琼(1999—),男,江苏淮安人,硕士,从事矿山充填开采理论与技术研究。E-mail:1415623442@qq.com

通信作者: 郭进平(1970—),男,湖北当阳人,副教授,硕士研究生导师,从事复杂矿床开采理论与技术研究。E-mail:guojinping@xauat.edu.cn

然选择^[1-3]。但充填体在深部采场中,会受到周围爆破等动载扰动,以及高岩温环境的影响^[4-5]。因此,非常有必要对充填体在温度效应下的力学特性进行研究。

目前,众多学者对充填体的动态力学特性开展了大量研究,并获得了卓有成效的研究成果^[6-17]。这些研究对充填体在动载荷作用下破坏损伤机理进行了较好地解释,但主要是基于常温条件下进行的充填体特性分析,养护温度与井下实际温度有较大差别,不同温度下充填体水化反应会出现较大差异。鉴于此,本文控制充填体养护温度分别为 20、35、50、65 °C,养护龄期分别为 7、14、28 d,采用分离式霍普金森压杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)试验系统对充填体进行单轴冲击试验,探究不同养护温度与养护龄期条件下充填体的动态抗压强度及能量演化变化规律。

1 充填体 SHPB 冲击试验

1.1 试验材料

充填体由某铁矿的全尾砂、P.O 42.5 普通硅酸盐水泥和实验室自来水制备而成。全尾砂化学成分见表 1,粒径分布曲线如图 1 所示,中值粒径 d_{50} 为 219.45 μm ,不均匀系数 C_u 与曲率系数 C_c 分别为 12.57 和 2.08,级配良好。

表 1 全尾砂化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of total tailings %

SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	Al ₂ O ₃	CaO	其他
67.72	20.65	3.16	2.05	4.66	1.76

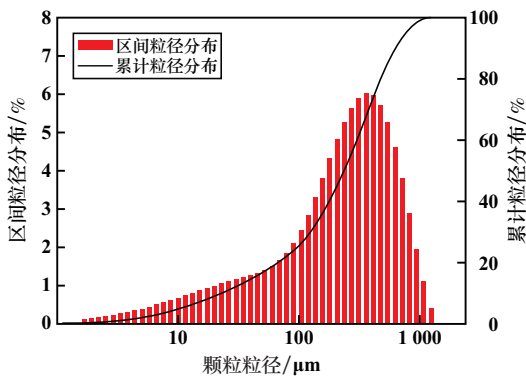


图 1 全尾砂粒径分布

Fig. 1 Particle size distribution of total tailings

1.2 试验原理

利用 SHPB 试验系统进行充填体试件动态单轴冲击试验,配合测速仪与超动态应变仪完成数据采集,试验装置如图 2 所示。该 SHPB 试验系统入射杆长 3 m,透射杆长 2.5 m,杆直径 50 mm,杆件材料为合金钢,撞

击杆(子弹)长 0.4 m,杆件弹性模量 206 GPa,密度 7.74 g/cm³,在冲击充填体试件前需确保子弹头与压杆同轴,充填体试件端面进行打磨和抛光后保证端面平整,以便能与入射杆及透射杆紧密贴合,且试件与压杆的轴心在同一直线上。

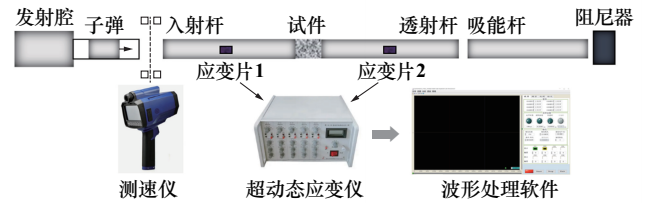


图 2 SHPB 试验系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of SHPB testing system

在试验中,需对试件两端是否达到应力平衡进行检验^[18]。根据一维应力波理论和应力平衡假设,试件的应力、应变、平均应变率与时间的关系^[19]分别为:

$$\sigma_s = \frac{E_0 A_0}{A_s} \varepsilon_T \quad (1)$$

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

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

式中: σ_s 为试件的动态应力,MPa; A_0 为入射杆的横截面积,mm²; A_s 为试件的横截面积,mm²; E_0 为杆件的弹性模量,GPa; l_s 为试件的厚度,mm; C_0 为弹性应力波波速,m/s; ε_s 为试件的动态应变; $\dot{\varepsilon}_s$ 为试件的动态应变率; ε_T 、 ε_R 分别为透射应变、反射应变。

1.3 试验方案

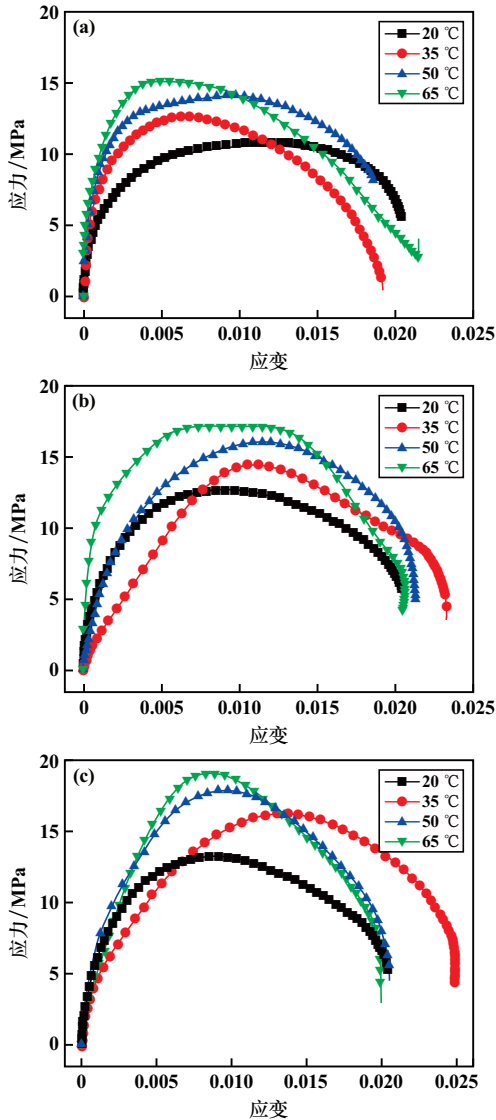
采用自制的亚克力圆柱体模具($\Phi 50 \times H 25$ mm)制备充填体试件,过程如下:制备灰砂比(质量比) 1:4、质量分数 78%的充填料浆;将充填料浆浇筑于模具中,振荡搅拌均匀后放入 HWS-150 高温高湿养护箱中养护,养护箱可控制温度范围 0~75 °C,误差 ± 0.5 °C;24 h 后脱模,养护箱温度分别设定为 20、35、50、65 °C,湿度设定为 95%,养护龄期 7、14、28 d;达到养护龄期后,采用端面打磨机对试件上下表面进行打磨,确保试件平整度小于 0.02 mm;对打磨平整后的试件进行冲击试验:采用 0.1 MPa 的冲击气压,撞击杆(子弹)进入发射管 1.2 m 且保持每次试验的深度固定不变,控制冲击速度 4.5 m/s 左右,应变率约 100 s⁻¹,并借助数据处理软件对结果进行分析处理;试验结束后选取 1 cm³ 充填体制备扫描电镜样品,使用导电胶将试件粘接到可导电铁片上,再对试件喷碳镀膜确保其导电性良好,观

察充填体微观形貌特征。

2 试验结果分析

2.1 应力-应变曲线特征

试件养护龄期分别达到 7、14、28 d 时,对不同养护温度条件下的充填体进行近似应变率单轴冲击试验,得到充填体的应力-应变曲线如图 3 所示。由图 3 可知,不同养护温度条件下充填体应力-应变曲线具有相似性,均可划分为 3 个阶段。



(a) 养护龄期 7 d; (b) 养护龄期 14 d; (c) 养护龄期 28 d

图 3 充填体应力-应变曲线

Fig.3 Stress-strain curve of backfill mass

1) 似弹性阶段:该阶段应力-应变曲线近似于一条直线。子弹撞击入射杆后,应力波与试件的交界面发生透射和反射,试件从外界吸收的能量大部分转化为弹性应变能积聚在试件内部,其原始微裂隙周边产

生应力集中,小部分能量转化为耗散能用于微裂隙缓慢发育,试件整体处于弹性变形,直至试件内部应力达到均匀。

2) 塑性变形阶段:应力-应变曲线走势放缓,表现为上凸形曲线。试件内部积聚的应变能逐渐释放,吸收的能量全部转化为耗散能,在二者共同作用下,其内部原始裂纹和新生裂纹开始迅速扩展,原始损伤不断累积,逐渐达到应力峰值。其中,养护龄期达到 7 d 时,20、35、50、65 °C 条件下养护的充填体动态峰值强度分别为 10.78、12.57、14.10、15.15 MPa。

3) 峰后破坏阶段:随着加载过程的持续,试件内部微裂隙逐渐发育成贯穿裂纹,在此阶段试件表面产生一条或多条与荷载方向平行的宏观裂纹,试件沿着这些裂纹发生劈裂拉伸破坏。但不同养护温度条件下充填体呈现的峰后破坏阶段曲线特征有所不同,在 35、50、65 °C 条件下养护 14、28 d 时,充填体试件的应力应变曲线出现“骤降”现象。其原因主要是在高应变率加载条件下,试件迅速产生大量裂纹并形成宏观破裂面,继而产生整体破坏,曲线迅速跌落至残余强度,后续不再继续产生应变。

2.2 动态抗压强度变化特征

2.2.1 养护龄期对充填体动态抗压强度影响

图 4 为不同养护龄期充填体动态抗压强度变化图,采用 Asymptotic 模型进行拟合,拟合效果良好。养护温度 20 °C 时,充填体 14 d 抗压强度较 7 d 抗压强度增长了 1.85 MPa,28 d 抗压强度较 14 d 抗压强度增长了 0.59 MPa。养护温度 65 °C 时,充填体 14 d 抗压强度较 7 d 抗压强度增长了 2.00 MPa,28 d 抗压强度较 14 d 抗压强度增长了 1.93 MPa。不同龄期的充填体,养护温度越高,动态抗压强度增量也越大,但养护龄期 14~28 d 的抗压强度增量不及 7~14 d 的抗压强度增量。相同养护温度条件下,充填体动态抗压强度随着

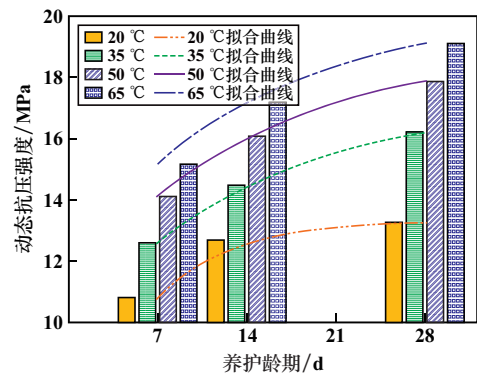


图 4 不同养护龄期充填体动态抗压强度

Fig.4 Compressive strength of backfill mass under dynamic loading after different curing time

养护龄期增加先快速增长后趋于平缓。养护龄期与动态抗压强度拟合方程如表2所示。

表2 养护龄期与动态抗压强度拟合方程

Table 2 Fitting equation between curing time and compressive strength under dynamic loading

养护温度/℃	养护龄期/d	拟合方程	R^2	P
20	7~28	$\sigma_{20} = 13.283 - 8.514 \times 0.840^x$	0.997	0.015
35	7~28	$\sigma_{35} = 17.205 - 7.690 \times 0.930^x$	0.999	0.022
50	7~28	$\sigma_{50} = 18.894 - 7.943 \times 0.930^x$	0.999	0.034
65	7~28	$\sigma_{65} = 20.273 - 8.327 \times 0.933^x$	0.999	0.021

2.2.2 养护温度对充填体动态抗压强度影响

图5为不同养护温度胶结充填体的动态抗压强度变化图,采用 Asymptotic 模型进行拟合,拟合效果良好。不同养护龄期充填体动态抗压强度均随着养护温度提高而提高,说明提高养护温度有助于提升充填体动态抗压强度。养护温度与动态抗压强度拟合方程如表3所示。

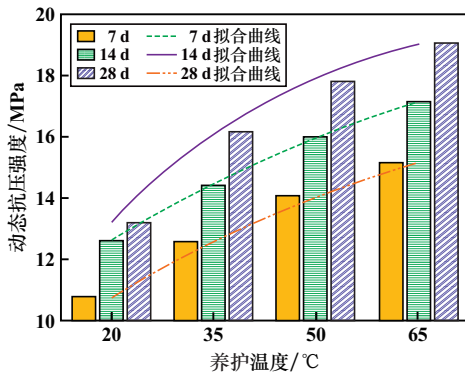


图5 不同养护温度充填体动态抗压强度

Fig.5 Compressive strength of backfill mass under dynamic loading at different curing temperature

表3 养护温度与动态抗压强度拟合方程

Table 3 Fitting equation between curing temperature and compressive strength under dynamic loading

养护龄期/d	养护温度/℃	拟合方程	R^2	P
7	20~65	$\sigma_7 = 19.122 - 11.651 \times 0.984^x$	0.999	0.016
14	20~65	$\sigma_{14} = 21.911 - 12.535 \times 0.985^x$	0.999	0.021
28	20~65	$\sigma_{28} = 20.873 - 14.410 \times 0.969^x$	0.999	0.025

2.3 能量演化规律

充填体变形破坏过程伴随着能量转移和转化。在冲击荷载作用下,充填体内部裂纹孔隙的扩展演化及破坏实质是能量耗散的结果^[20]。在动态加载过程中,

当子弹头撞击入射杆时,会产生入射能 E_I ,然后在试件与杆的界面处反射一部分能量,为反射能 E_R ,其余的能量传递到试件,一部分被试件吸收,对试件造成破坏,为吸收能 E_A ,一部分能量穿透试件,为透射能 E_T 。根据试验得到的入射应力 σ_I 、反射应力 σ_R 和投射应力 σ_T ,可以计算出撞击时的能量,公式^[21]为:

$$E_I = \frac{A_0}{\rho C_0} \int_0^\tau \sigma_I^2(t) dt \quad (4)$$

$$E_R = \frac{A_0}{\rho C_0} \int_0^\tau \sigma_R^2(t) dt \quad (5)$$

$$E_T = \frac{A_0}{\rho C_0} \int_0^\tau \sigma_T^2(t) dt \quad (6)$$

式中: ρ 为杆密度, g/cm^3 ; τ 为应力波的持续时间, μs ; E_I 、 E_R 、 E_T 分别为试件入射能、反射能、透射能, J 。根据能量守恒定律,可以得到试件的吸收能为:

$$E_A = E_I - E_R - E_T \quad (7)$$

反射能、透射能与吸收能的能量比率计算公式为:

$$\hat{E}_R = \frac{E_R}{E_I} \quad (8)$$

$$\hat{E}_T = \frac{E_T}{E_I} \quad (9)$$

$$\hat{E}_A = \frac{E_A}{E_I} \quad (10)$$

吸能密度可以反映试件吸收能量的能力,计算公式为:

$$\rho_E = \frac{E_A}{V} \quad (11)$$

式中: ρ_E 为吸能密度, J/cm^3 ; V 为充填体体积, cm^3 。

根据以上公式可计算得到充填体受动载作用下的各能量参数,结果如表4所示。

入射能来源于子弹撞击杆,试验为控制近似的应变率而采用相近的子弹冲击速度,所以不同养护龄期与养护温度条件下的充填体入射能比较接近。由表4可观察到,在动态加载过程中,绝大部分能量都被反射回去,充填体试件的反射能比率在77%左右,仅有微小的能量穿透试件,透射能比率在2%左右,这是因为充填体内部存在较密集的裂隙及孔隙,波阻抗较低,应力波较难透过试件。试件的吸收能比率均在20%左右,试件吸收能量主要用于试件原生孔隙的压密、裂隙的衍生及扩展。

2.3.1 养护龄期对充填体吸能密度及透射能影响

不同养护龄期下充填体吸能密度、透射能的变化如图6~7所示。相同养护温度下,充填体吸能密度随着养护龄期增加而增加,且增长速度逐渐减缓,养护龄

表 4 充填体能量参数

Table 4 Energy parameters of backfill mass

试件编号	应变率/s ⁻¹	入射能/J	反射能/J	透射能/J	吸收能/J	反射能比率/%	透射能比率/%	吸收能比率/%	吸能密度/(J·cm ⁻³)
20-7	101.2	46.616	36.753	0.890	9.101	78.84	1.91	19.52	0.185 5
20-14	97.5	44.217	34.200	0.897	9.125	77.34	2.03	20.64	0.186 0
20-28	99.3	45.197	35.036	0.900	9.135	77.52	1.99	20.21	0.186 2
35-7	96.7	43.738	33.713	0.897	9.123	77.08	2.04	20.86	0.186 0
35-14	102.6	47.671	37.485	0.905	9.144	78.63	1.88	19.18	0.186 4
35-28	97.1	44.104	33.662	0.910	9.152	76.33	2.04	20.75	0.186 5
50-7	98.2	44.538	34.397	0.901	9.140	77.23	2.02	20.52	0.186 3
50-14	99.8	45.235	34.952	0.909	9.150	77.27	2.01	20.23	0.186 5
50-28	103.8	48.534	38.031	0.913	9.160	78.36	1.88	18.87	0.186 7
65-7	99.4	45.204	34.960	0.907	9.149	77.34	2.01	20.24	0.186 5
65-14	102.5	47.368	36.951	0.914	9.160	78.01	1.93	19.34	0.186 7
65-28	95.2	42.382	31.822	0.917	9.167	75.09	2.16	21.63	0.186 9

期达到 28 d 时趋于平稳。主要原因是随着养护龄期增加,充填体内部微观结构会变得越来越紧凑致密^[22],试件内部微观裂隙的扩展贯通演化到试件最终破坏需要吸收更多的能量。但随着养护龄期增加,充填体动态抗压强度趋于稳定,所以充填体吸能密度也会随着养护龄期增加而趋于稳定。充填体透射能亦随着养护龄期增加而增长,增长趋势与吸能密度增长趋

势较为相近。吸能密度、透射能与养护龄期拟合方程如表 5~6 所示,拟合效果良好。

表 5 养护龄期与吸能密度拟合方程

Table 5 Fitting equation between curing time and energy absorption density

养护温度/℃	养护龄期/d	拟合方程	R ²	P
20	7~28	$\rho_{20} = 0.186 - 2.000 \times 10^{-3} \times 0.886^x$	0.998	0.027
35	7~28	$\rho_{35} = 0.187 - 1.750 \times 10^{-3} \times 0.858^x$	0.998	0.017
50	7~28	$\rho_{50} = 0.187 - 8.960 \times 10^{-4} \times 0.917^x$	0.999	0.024
65	7~28	$\rho_{65} = 0.187 - 9.000 \times 10^{-4} \times 0.896^x$	0.999	0.022

表 6 养护龄期与透射能拟合方程

Table 6 Fitting equation between curing time and transmissive energy

养护温度/℃	养护龄期/d	拟合方程	R ²	P
20	7~28	$E_{20} = 0.901 - 0.028 4 \times 0.870^x$	0.998	0.019
35	7~28	$E_{35} = 0.912 - 0.030 1 \times 0.904^x$	0.999	0.025
50	7~28	$E_{50} = 0.914 - 0.029 8 \times 0.883^x$	0.999	0.028
65	7~28	$E_{65} = 0.918 - 0.029 1 \times 0.871^x$	0.998	0.031

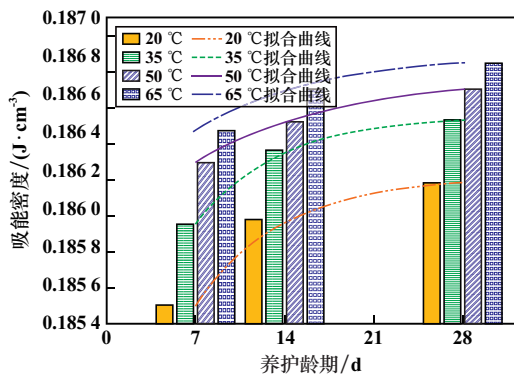


图 6 不同养护龄期下充填体的吸能密度

Fig. 6 Energy absorption density of backfill mass after different curing time

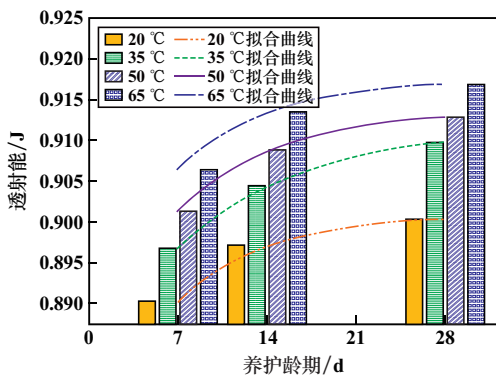


图 7 不同养护龄期下充填体透射能

Fig. 7 Transmissive energy of backfill mass after different curing time

2.3.2 养护温度对充填体吸能密度及透射能影响

不同养护温度下充填体吸能密度、透射能的变化如图 8~9 所示。相同养护龄期下,充填体吸能密度与透射能皆随着养护温度升高而增长,但充填体透射能增幅较小。其原因在于,虽然提高养护温度有助于充填体的水化反应形成致密的微观结构,但其内部仍存在孔隙与裂隙,这与钢制入射杆的材质存在较大差异,导致二者的波阻抗也存在较大差异。当应力波传播至试件的端面后,由于波阻抗效应,应力波很难透射过试件^[23]。吸能密度、透射能与养护温度拟合方程如表 7~8 所示,拟合效果良好。

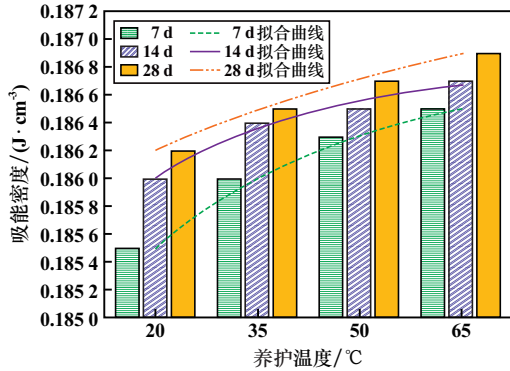


图8 不同养护温度下充填体吸能密度

Fig. 8 Energy absorption density of backfill mass at different curing temperature

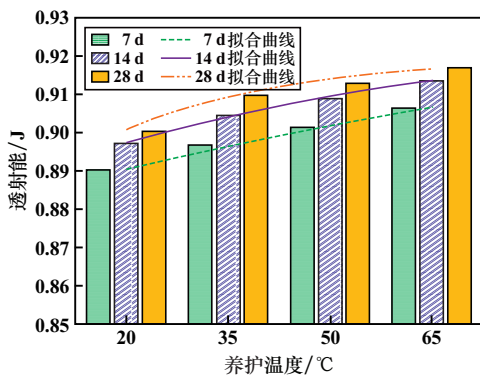


图9 不同养护温度下充填体透射能

Fig. 9 Transmissive energy of backfill mass at different curing temperature

表7 养护温度与吸能密度拟合方程

Table 7 Fitting equation between curing temperature and energy absorption density

养护龄期/d	养护温度/°C	拟合方程	R^2	P
7	20~65	$\rho_7 = 0.187 - 0.00247 \times 0.969^x$	0.999	0.032
14	20~65	$\rho_{14} = 0.187 - 0.00173 \times 0.963^x$	0.977	0.027
28	20~65	$\rho_{28} = 0.188 - 0.00189 \times 0.985^x$	0.998	0.021

表8 养护温度与透射能拟合方程

Table 8 Fitting equation between curing temperature and transmissive energy

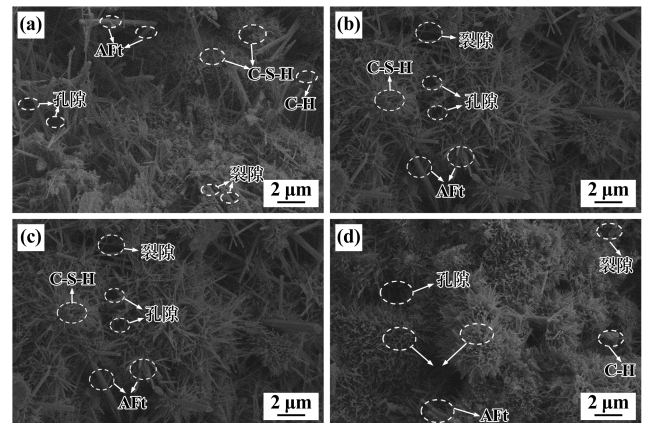
养护龄期/d	养护温度/°C	拟合方程	R^2	P
7	20~65	$E_7 = 0.937 - 0.0565 \times 0.991^x$	0.998	0.014
14	20~65	$E_{14} = 0.927 - 0.0423 \times 0.983^x$	0.996	0.032
28	20~65	$E_{28} = 0.920 - 0.0430 \times 0.960^x$	0.989	0.018

2.4 养护温度对充填体强度及能量演化影响机理

充填体内部裂隙衍生、扩展是能量演化的过程,充填体受动态冲击后最终破坏程度是自身强度的体现,

也是能量演化的结果。胶结充填体属于水泥基材料,水泥水化反应程度与温度密切相关^[24]。图10为养护温度分别为20、35、50、65℃时充填体在养护龄期达到28d时的微观形貌。由图10可观察到,胶结充填体的微观结构主要由纤维状及絮状水化硅酸钙(C-S-H)、交错针状钙矾石(AFt)以及板状氢氧化钙(C-H)组成。养护温度20℃时,胶结充填体内部微观结构相对疏松,多孔且多裂隙,水化产物之间的连接性较差,使得胶结充填体内部产生大量孔隙水化。养护温度65℃时,胶结充填体内部的连接作用加深,絮状C-S-H之间包裹着AFt和C-H,使之形成致密的复杂网状结构,且C-S-H胶凝体较好地包裹了尾砂颗粒,使得充填体内部水化产物之间形成了较为整体的连接方式,颗粒间的孔隙被水化产物填充,从而使得孔隙体积逐渐降低。

由此可知,温度升高,胶结充填体内部水化反应速率升高,水化程度增加且水化产物增多,胶结充填体内部孔隙被水化产物填充,形成更加致密的微观结构,从而增强抵抗外界动态扰动的能力。这表明养护温度的提升能促进胶结充填体整体强度的提升。



(a) 养护温度 20 °C ; (b) 养护温度 35 °C ;
(c) 养护温度 50 °C ; (d) 养护温度 65 °C

图10 充填体微观形貌

Fig. 10 Microscopic morphology of backfill mass

3 结论

1) 升高养护温度和增加养护龄期,充填体动态抗压强度均增长。

2) 养护温度升高使胶结充填体内部水化反应速率升高,水化程度增加且水化产物增多,胶结充填体内部微观结构更为致密,从而抵抗外界动态扰动的能力越强,说明提高养护温度能促进胶结充填体早期强度的提升。

3) 充填体的波阻抗较钢制杆差异较大,冲击过程

中77%左右能量被反射,2%左右能量透射过充填体。充填体吸收的能量主要用于充填体原生孔隙的压密、裂隙的衍生扩展。充填体的吸能密度与透射能随着养护龄期与养护温度增加呈上升趋势。

参考文献(References):

- [1] 李夕兵,刘冰. 硬岩矿山充填开采现状评述与探索[J]. 黄金科学技术, 2018,26(4):492-502.
LI Xibing, LIU Bing. Review and exploration of current situation of backfill mining in hard rock mines[J]. Gold Science and Technology, 2018,26(4):492-502.
- [2] 蔡美峰,马明辉,潘继良,等. 矿产与地热资源共采模式研究现状及展望[J]. 工程科学学报, 2022,44(10):1669-1681.
CAI Meifeng, MA Minghui, PAN Jiliang, et al. Co-mining of mineral and geothermal resources: A state-of-the-art review and future perspectives[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022,44(10):1669-1681.
- [3] 吴爱祥,张晋军,王贻明,等. 膏体充填:金属矿绿色开采的变革性技术[J]. 中国有色金属学报, 2024,34(5):1652-1666.
WU Aixiang, ZHANG Jinjun, WANG Yiming, et al. Cemented paste backfill: A transformative technology for green mining in metal mines[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024,34(5):1652-1666.
- [4] 贾冲,赵越,郭利杰,等. 考虑压力和温度养护条件的胶结充填体早期强度特性研究[J]. 金属矿山, 2024(4):14-19.
JIA Chong, ZHAO Yue, GUO Lijie, et al. Study on early strength characteristics of cemented backfill considering curing conditions of pressure and temperature[J]. Metal Mine, 2024(4):14-19.
- [5] 甘德清,常英杰,张友志,等. 考虑温度影响的充填料浆水平管流特性研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(2):19-23.
GAN Deqing, CHANG Yingjie, ZHANG Youzhi, et al. Flow characteristics of backfilling slurry in horizontal pipe under influence of temperature[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022,42(2):19-23.
- [6] 王浩,张智宇,王建国,等. 不同配比全尾砂胶结充填体的动态损伤特性[J]. 有色金属工程, 2021,11(4):110-117.
WANG Hao, ZHANG Zhiyu, WANG Jianguo, et al. Dynamic damage characteristics of cementing backfill with different ratio of tailings[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2021,11(4):110-117.
- [7] 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 Qinli, 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.
- [8] SUN W, ZHANG S Y, LI J X, et al. Experimental study on energy dissipation of layered backfill under impact load[J]. Construction and Building Materials, 2022,347:128478.
- [9] 李金鑫,孙伟,李兆宇,等. 冲击荷载作用下分层充填体能量演化与破坏模式分析[J]. 材料导报, 2023,37(20):87-95.
LI Jinxin, SUN Wei, LI Zhaoyu, et al. Analysis of energy evolution and failure mode of layered backfill under impact load[J]. Materials Reports, 2023,37(20):87-95.
- [10] 刘伟涛,王莹莹,杨莹,等. 自流充填管道局部变径满管输送的环管试验[J]. 矿冶工程, 2023,43(6):20-23.
LIU Weitao, WANG Yingying, YANG Ying, et al. Loop pipe test on transportation with full pipe flow in a tapered pipeline with gravity-fed backfill[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(6):20-23.
- [11] 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.
HOU Yongqiang, YIN Shenghua, YANG Shixing, et al. Energy consumption characteristics and damage characteristics of full tailings cemented backfill under impact loading[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021,31(6):1661-1671.
- [12] 秦梨,邓涛,张成良,等. 动载下尾砂胶结充填体的损伤规律与本构关系研究[J]. 工程爆破, 2023,29(3):46-54.
QIN Li, DENG Tao, ZHANG Chengliang, et al. Research on the damage law and constitutive relation of cemented tailings backfill under dynamic load[J]. Engineering blasting, 2023,29(3):46-54.
- [13] HU Y, LI Z, SU Y W, et al. Analyzing the energy and damage constitutive of cemented backfill with different water content under dynamic load[J]. Materials, 2023,16(16):5677.
- [14] 李祥龙,李强,王建国,等. 胶结充填体冲击破坏及损伤演化数值模拟研究[J]. 北京理工大学学报, 2022,42(7):733-740.
LI Xianglong, LI Qiang, WANG Jianguo, et al. Numerical simulation research on impact failure and damage evolution of cemented backfill[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2022,42(7):733-740.
- [15] 刘金枝,殷菲,高子明. 多因素下尾砂充填料浆流变参数试验研究及预测分析[J]. 矿冶工程, 2023,43(6):15-19.
LIU Jinzhi, YIN Fei, GAO Ziming. Experimental research and prediction analysis of rheological parameters of tailings backfill with multi-factors[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(6):15-19.
- [16] 邓红卫,罗黎明,李爽,等. 动力扰动作用下充填体的力学响应研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2016,12(2):62-67.
DENG Hongwei, LUO Liming, LI Shuang, et al. Study on mechanical response of backfill under dynamic disturbance[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016,12(2):62-67.
- [17] 张友锋,付玉华,余姚. 多次冲击下膨润土胶结充填体力学特性试验研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(1):30-34.
ZHANG Youfeng, FU Yuhua, YU Yao. Experimental study on mechanical properties of cemented filling body with bentonite under repeated impacts[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022,42(1):30-34.
- [18] 耿昊,杨江坤,宋彦琦,等. 泥岩动态冲击力学响应及裂纹演化试验研究[J]. 金属矿山, 2023(10):45-52.
GEN Hao, YANG Jiangkun, SONG Yanqi, et al. Experimental study on dynamic impact mechanical response and crack evolution of mudstone[J]. Metal Mine, 2023(10):45-52.
- [19] 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 Yuye, WANG Jie, SONG Weidong, 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.
- [20] 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):50-56.
- HOU Yongqiang, YIN Shenghua, YANG Shixing, et al. Mechanical properties and energy consumption characteristics of cemented backfill under impact load[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2020,48(8):50-56.
- [21] 王智德,钱梦凡,李杰,等. 高应变率冲击荷载下节理花岗岩损伤机理研究[J]. 岩土力学, 2024(7):1-12.
- WANG Zhide, QIAN Mengfan, LI Jie, et al. Damage mechanism of jointed granite under high strain rate impact loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024(7):1-12.
- [22] 罗正东,蒋波,章本本,等. 碱激发金矿粉充填材料力学性能及微观分析[J]. 矿冶工程, 2023,43(4):21-25.
- LUO Zhengdong, JIANG Bo, ZHANG Benben, et al. Mechanical properties and microscopic analysis of alkali-activated backfill material with gold mine tailings powder[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(4):21-25.
- [23] 杨仁树,李炜煜,方士正,等. 波阻抗对岩石动力学特性影响的模拟试验研究[J]. 振动与冲击, 2020,39(3):178-185.
- YANG Renshu, LI Weiyu, FANG Shizheng, et al. Tests for effects of wave impedance on rock's dynamic performance[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020,39(3):178-185.
- [24] 徐玲琳,欧阳军,杨青,等. 养护温度对矿渣硫铝酸盐水泥水化的影响机理[J]. 材料导报, 2023,37(11):92-96.
- XU Linglin, OUYANG Jun, YANG Ken, et al. Impacts of curing temperature on the hydration of slag-calcium sulphoaluminate cement[J]. Materials Reports, 2023,37(11):92-96.
- 引用本文: 吴琼,郭进平,王小林,等. 温度效应下胶结充填体动态强度及能量演化特征[J]. 矿冶工程, 2025,45(1):27-34.
- WU Qiong, GUO Jinping, WANG Xiaolin, et al. Effect of temperature on strength and energy evolution characteristics of cemented backfill mass under dynamic loading[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(1):27-34.

《矿冶工程》征订启事

《矿冶工程》(双月刊)由长沙矿冶研究院有限责任公司、中国金属学会主办,面向国内外公开发行人。本刊是中国期刊方阵“双效期刊”、全国中文核心期刊、中国科技核心期刊、CACJ中国应用型核心期刊,是集学术性和技术性于一体的综合性刊物,已被中国知网(CNKI)、万方数据库、重庆维普资讯、长江文库等全文收录,是国外多家知名检索机构的检索对象。

《矿冶工程》读者对象是采矿、选矿、冶金、材料、地质、化工等系统的有关生产人员、院校师生和管理人员。主要栏目为采矿、选矿、冶金、材料、矿冶行业企业管理等,内容新颖,是开拓、激发创造力的良师益友。

《矿冶工程》编辑部承接彩色、黑白及文字广告业务,欢迎各企事业单位来电来函联络。

《矿冶工程》真诚欢迎新、老订户向全国各地邮局订阅本刊,也可直接向编辑部订阅。邮发代号:42—58,大16开,定价20元/册,全年6册共120元。

地 址: 湖南省长沙市麓山南路966号
 邮 编: 410012
 电 话: (0731)88657070/88657176/88657173
 传 真: (0731)88657186
 E-mail: kuangyegongchengzz@163.com

联 系 人: 黄小芳
 开户名称: 矿冶工程杂志(长沙)有限公司
 开户银行: 工商银行长沙左家垅支行
 账 号: 1901013009201095502
 网 址: <http://www.kygczz.com>