

高喜才,赵程,王琪,等. 早龄期充填混凝土力学行为超声波表征[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2022, 4(5): 053012.

GAO Xicai, ZHAO Cheng, WANG Qi, et al. Ultrasonic characterization of mechanical behavior of backfilling concrete at early age[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2022, 4(5): 053012.

## 早龄期充填混凝土力学行为超声波表征

高喜才<sup>1,2</sup>, 赵程<sup>1,2</sup>, 王琪<sup>1,2</sup>, 马腾飞<sup>1,2</sup>, 刘帅<sup>1,2</sup>

(1. 西安科技大学 能源学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安科技大学 西部矿井开采及灾害防治教育部重点实验室, 陕西 西安 710054)

**摘要:**为研究早龄期巷旁充填混凝土损伤破坏超声波预测方法,制备了7,14,21,28 d等4种早龄期充填混凝土试件,采用扫描电镜观测其微观形貌,并进行单轴压缩力学特性测试,分析了充填混凝土损伤累积过程中连续超声波参数变化规律。试验结果表明:随着龄期增长,充填混凝土试件内部结构逐渐致密,使得混凝土单轴抗压强度、弹性模量呈非线性递增,泊松比呈非线性递减,超声波波速、主频幅值呈递增关系;主频幅值表现出与试件裂隙扩展有很高的相关性,根据主频幅值极值点确定了裂隙闭合应力点 $\sigma'_{cc}$ 及损伤应力点 $\sigma'_{cd}$ ,并依据特征应力点划分了裂隙发育的3个阶段,可以将主频幅值的极大值点作为充填混凝土失稳破坏的前兆信息,为巷旁充填混凝土承载性能超声波预测提供了理论基础。

**关键词:**单轴压缩;早龄期;充填混凝土;力学行为;超声波表征

中图分类号:TD32

文献标志码:A

文章编号:2096-7187(2022)05-3012-08

## Ultrasonic characterization of mechanical behavior of backfilling concrete at early age

GAO Xicai<sup>1,2</sup>, ZHAO Cheng<sup>1,2</sup>, WANG Qi<sup>1,2</sup>, MA Tengfei<sup>1,2</sup>, LIU Shuai<sup>1,2</sup>

(1. College of Energy Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Western Mine Exploitation and Hazard Prevention, Ministry of Education, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** In order to study the ultrasonic prediction method of damage and failure of early age roadside filling concrete, four early age filling concrete specimens of 7, 14, 21, 28 d were prepared. The microstructure was observed by scanning electron microscope, and the uniaxial compression mechanical properties were tested. The variation of continuous ultrasonic parameters in the process of damage accumulation of filling concrete was analyzed. The experimental results showed that with the increase of age, the internal structure of the filled concrete specimen was gradually dense, leading to nonlinear increase in the uniaxial compressive strength and the elastic modulus of the concrete. The Poisson's ratio showed a nonlinear decreasing trend, and the ultrasonic wave velocity and the main frequency amplitude showed an increasing relationship. The amplitude of the main frequency had a high correlation with the crack propagation of the specimen. According to the extreme value point of the main frequency amplitude, the crack closure stress point  $\sigma'_{cc}$  and the damage stress point  $\sigma'_{cd}$  were determined. The crack development was divided into three stages according to the characteristic stress point. The maximum value point of the main

收稿日期:2022-03-01

修回日期:2022-04-12

责任编辑:李青

基金项目:山东省重大科技创新工程资助项目(2019JZZY020326);陕西省自然科学基金基础研究计划—陕煤联合基金资助项目(2021JLM-10)

作者简介:高喜才(1980—),男,河南南阳人,副教授,硕士生导师,博士,主要从事矿山压力与岩层控制、岩石力学等方面的研究工作。E-mail: gxcai07@163.com

通信作者:赵程(1996—),男,陕西眉县人,硕士研究生,主要从事岩石力学等方面的研究工作。E-mail: 447272517@qq.com

frequency amplitude can be used as the precursor information of the instability and failure of the filling concrete, which provided a theoretical basis for the ultrasonic prediction of the bearing performance of the roadside filling concrete.

**Key words:** uniaxial compression; early age; backfilling concrete; mechanical behavior; ultrasonic characterization

沿空留巷技术作为无煤柱护巷方式之一,对合理开发地下资源,提高煤炭采出率,延长矿井服务年限具有重要意义<sup>[1-2]</sup>。煤矿巷旁充填体承载性能关乎沿空留巷的成败,目前巷旁充填材料中混凝土的应用最为广泛,而在其达到设计强度前就受到开采影响,如果能够对充填体的承载性能进行实时监测,就能在其失稳前采取措施从而减少事故的发生。因此,研究早龄期巷旁充填混凝土承载性能实时监测方法意义重大。

近年来主要利用声发射技术对充填材料内部损伤进行被动监测<sup>[3-10]</sup>,该方法由于系统成熟、数据采集方便等优点在煤矿充填体监测中应用普遍,但随着监测要求的提高,超声波作为一种高精度的主动监测技术越来越受到重视。超声波可用于描述材料节理、孔隙等特性,以及外加载作用下的损伤过程<sup>[11-24]</sup>。1992年,李为杜<sup>[15]</sup>等利用CTS-25型低频超声仪对混凝土进行了测试,得出超声波在疏松混凝土中比在密实混凝土中传播时高频成分更多、能量衰减更大,在混凝土受力开裂过程中,随着加载应力接近峰值应力,内部裂隙发育,超声波信号变化明显;为了掌握混凝土硬化程度,肖楚珺<sup>[16]</sup>等提出了基于超声波频谱分析的碾压混凝土凝结状态的快速判断方法,根据超声波频谱分布规律可以实时判断碾压混凝土材料的凝结状态;杨昌民<sup>[17]</sup>和姚菲<sup>[18]</sup>等为了研究预应力混凝土桥孔道压浆质量的缺陷和混凝土-围岩的不同缺陷,设计冲击回波试验,提取反射信号时域数据进行快速傅里叶变换,拟合出缺陷和频率的关系式,可以精确地对缺陷进行识别评估;魏保立<sup>[19]</sup>等建立了超声波频谱与混凝土疲劳损伤的关系,利用频域分析方法对混凝土疲劳寿命进行预测;许延春<sup>[20]</sup>等采用超声波波速测定试验,得到各类岩性的岩石纵波波速均随着裂隙宽度的增大而减小的规律;蒋雨宏<sup>[21]</sup>设计了单轴压缩作用下混凝土的超声波测试试验,发现波速、主频幅值、二阶谐波幅值及非线性超声参数与应力均具有较好的相关性;高昊<sup>[22]</sup>等通过混凝土试件单轴压缩超声波试验,研究了养护龄期及试件尺寸对超声

波传播速度的影响;陈升平<sup>[23]</sup>等通过对单轴压缩下不同密实度的混凝土进行超声波测试,建立了波速与混凝土裂缝发展的关系。

上述研究通过超声波测试得到超声信号与混凝土缺陷有较高相关性的结论,但在早龄期巷旁充填混凝土承载性能超声波时频信号预测方面仍需进一步研究。笔者以煤矿沿空留巷巷旁充填混凝土材料为研究对象,研究巷旁充填混凝土在达到设计强度前(即早龄期)力学行为在超声波信号上的响应规律,提出基于超声波主频幅值的充填混凝土破坏失稳前兆特征,为超声波预测巷旁充填混凝土承载性能的研究提供了一定的理论基础。

## 1 试验设计

### 1.1 试件制备

以某矿3307工作面沿空留巷巷旁充填混凝土材料为研究对象,以水泥、碎石、河砂、减水剂、水为原材料按现场实际配比制备混凝土试件(图1),具体配比见表1。



图1 充填混凝土试件

Fig. 1 Backfilling concrete samples

表1 巷旁充填混凝土材料配比

Table 1 Proportion of roadside backfilling concrete material

材料	水泥	碎石	河砂	减水剂	水
比例	0.56	0.85	1	0.001 3	0.32

按照比例称取石子、河砂和水泥,将其混合搅拌均匀后加入水和减水剂搅拌3 min。在长方体模具(300 mm×120 mm×100 mm)内壁刷油,将搅拌好的

混凝土倒入模具中并进行振动,确保混凝土试件密实,养护1周后,通过取芯机、切磨一体机加工制备50 mm×100 mm的标准圆柱体试件25个,采用磨床对试件的两端进行抛光,以保证试件的平整度和平行度。

## 1.2 试验设备

### 1.2.1 电镜扫描试验

岩石或混凝土的内部结构对材料力学特性起关键作用<sup>[24]</sup>。对4种龄期充填混凝土试件取块体小样,并使用导电胶将其固定,为了增强混凝土导电性,对其表面进行喷金处理,制作完成后,采用Quanta450 & IE250X-Max50扫描电子显微镜对充填混凝土小样进行微观扫描。

### 1.2.2 单轴压缩试验

采用电液三轴伺服仪MTS815对混凝土试件进行力学性能测试,加载路径为常规单轴加载,加载速率为0.005 mm/s。于试件养护7, 14, 21, 28 d时进行单轴压缩试验,每个龄期选取3个试件进行重复试验,同时采集试件加载过程中荷载变化、轴向以及径向位移,数据采集频率为2 Hz。

### 1.2.3 超声波测试试验

试验前,用KB型试件夹持测试架测得充填混凝土敏感频率为140 kHz,因此以140 kHz的发射频率测取超声波在不同试件内的传播速度,剔除差异较大的试件,保证试件均一性。超声波检测系统包括波形发生器(KEYSIGHT 33500B Series)、高频高压放大器(ELECTRONICS A400DI)、示波器(KEYSIGHT DSOS054A),系统采样频率40 MHz,承压换能器频率0 ~ 700 kHz,承压峰值50 MPa,直径50 mm,高55 mm。试验时,为了减少端部效应并增强与超声波探头的耦合度,以凡士林为润滑剂涂抹在圆柱体试件的上下两端,将超声波承压换能器垂直置于试件两端,充填混凝土试件加载的同时采集超声波数据。试件加载装置及超声波承压换能器布设如图2所示。

## 2 试验结果分析

### 2.1 微观结构分析

4种龄期充填混凝土试件放大5 000倍的微观形貌如图3所示。由图3可知,7 d龄期时,试件水化产物水化硅酸钙凝胶(C-S-H)只有零星分布在骨料周围;14 d龄期时,试件水化产物有所增多,但骨料-水

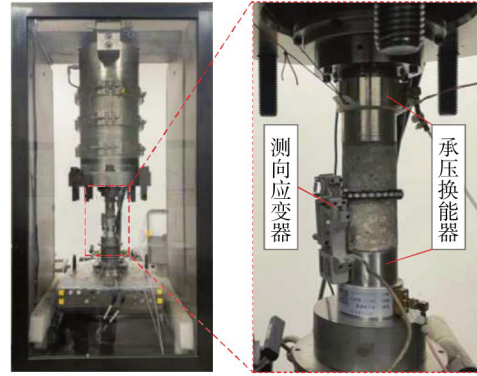
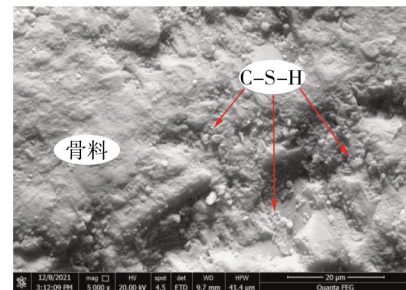
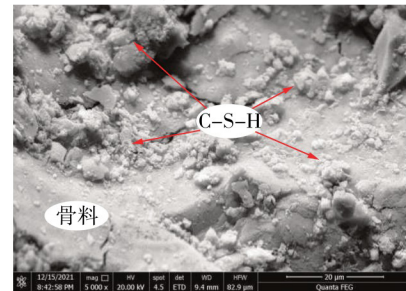


图2 试件加载装置及超声波承压换能器布设  
Fig. 2 Sample loading device and ultrasonic pressure transducer layout

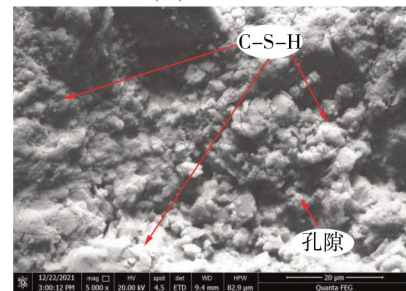
泥胶浆界面仍然薄弱;21 d龄期时,试件水化硅酸钙凝胶达到一定数量且与骨料之间形成相互连接,增强了骨料-水泥胶浆界面强度,但存在较多孔隙;28 d龄期时,随着水化反应的继续,大量水化硅酸钙凝胶与骨料之间形成连接,试件孔隙明显减少。可见随着龄期增长,水化产物增多,填充了内部孔隙,使混凝土中孔隙减小、孔隙率降低,内部更致密,且水化产物与骨料之间形成连接,增强了骨料-水泥胶浆界面强度。



(a) 7 d龄期



(b) 14 d龄期



(c) 21 d龄期

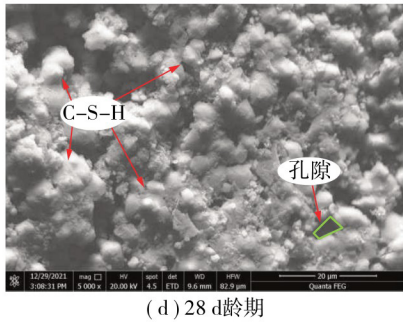


图3 不同龄期充填混凝土电镜扫描

Fig. 3 Scanning electron microscope of backfilling concrete at different ages

2.2 破坏形态分析

混凝土试件在制作过程中虽然已经通过振动、捣鼓等方式减少了试件内部气泡所产生的孔隙,但仍不可避免地存在少许微孔隙。这些微孔隙经过初期压力作用后压实闭合,在压力的继续作用下,微孔隙尖端发生应力集中,孔隙继续发育,并伴随着新的裂隙产生,原生微孔隙与新裂隙不断产生并积累,在此基础上贯穿后形成宏观裂隙面,造成试件整体破坏失稳(图4)。

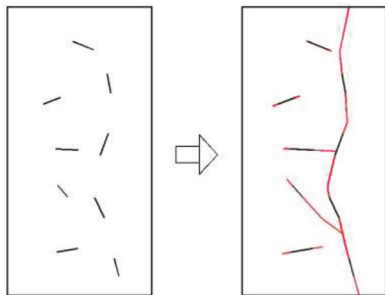


图4 充填混凝土试件失稳模式示意

Fig. 4 Backfilling concrete specimen instability mode

不同龄期充填混凝土破坏形态如图5所示。

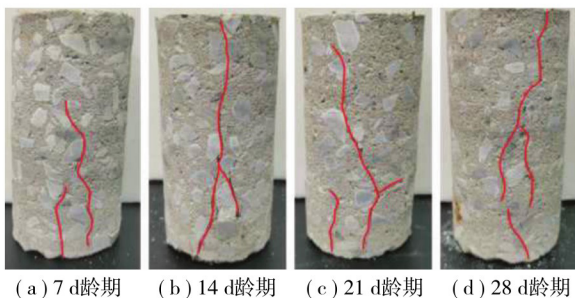


图5 不同龄期充填混凝土破坏形态

Fig. 5 Failure modes of backfilling concrete at different ages

由图5可以看出,4种龄期充填混凝土最终破坏形态相似,试件表面有宏观裂隙显现,无块体剥落,整体破碎程度较轻微。加载后,随着龄期增长,最

终破坏形态宏观裂隙发育程度相对更加剧烈,这是因为孔隙及微裂纹在压力作用下形成微裂缝并迅速扩展,孔隙越多越易使微裂缝之间相互连接贯通,更快造成充填体失稳破坏。

2.3 力学参数分析

利用单轴压缩试验,得到不同龄期充填混凝土的应力-应变变化规律,如图6所示。

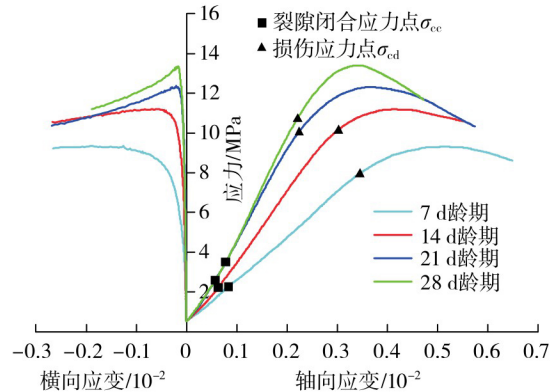


图6 不同龄期充填混凝土应力-应变关系

Fig. 6 Relation of stress-strain of backfilling concrete at different ages

根据应力-应变曲线变化规律可以得到其裂隙闭合应力点  $\sigma_{cc}$  和损伤应力点  $\sigma_{cd}$ , 裂隙闭合应力点  $\sigma_{cc}$  出现在17%~26%峰值应力处, 损伤应力点  $\sigma_{cd}$  出现在78%~84%峰值应力处。具体特征应力点见表2, 表中  $\sigma_c$  为峰值应力。

表2 充填混凝土特征应力点

Fig. 2 Characteristic stress points of backfilling concrete at different ages

龄期/d	$\sigma_c$ /MPa	$\sigma_{cc}$ /MPa	$\sigma_{cc}/\sigma_c$	$\sigma_{cd}$ /MPa	$\sigma_{cd}/\sigma_c$
7	9.57	2.12	22%	8.01	84%
14	12.34	2.09	17%	10.24	83%
21	12.92	2.66	21%	10.12	78%
28	13.35	3.46	26%	10.81	81%
平均			22%		82%

不同龄期充填混凝土抗压强度、弹性模量和泊松比变化规律如图7所示。随着龄期从7 d增加到14 d, 抗压强度增大了43%, 弹性模量增大了21%, 泊松比减小了2%; 14~21 d龄期抗压强度增大了8.31%, 弹性模量增大了7.78%, 泊松比减小了0.76%; 21~28 d龄期抗压强度增大了5.32%, 弹性模量增大了6.72%, 泊松比减小了0.24%。

抗压强度、弹性模量和泊松比与龄期的关系式为

$$\begin{cases} R_c = -0.009 1t^2 + 0.509t + 6.053 3 \\ E = -0.002 1t^2 + 0.132 2t + 2.513 5 \\ \mu = 0.000 02t^2 - 0.001 2t + 0.262 \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $R_c$  为单轴抗压强度, MPa;  $E$  为弹性模量, GPa;  $\mu$  为泊松比;  $t$  为养护龄期, d。

单轴抗压强度、弹性模量和泊松比与龄期拟合曲线相关性系数分别为0.995, 0.993和0.992 5, 均大于0.990, 二次多项式函数式可以较好地表征抗压强度、弹性模量和泊松比与龄期的关系。由式(1)和图7可知, 充填混凝土单轴抗压强度和弹性模量随龄期呈非线性递增趋势, 但增长速度渐减并趋向收敛; 泊松比随龄期呈非线性递减趋势, 整体降低幅度较小。结合前文充填混凝土破坏形态变化规律, 表明随龄期增长充填混凝土水化反应逐渐减弱, 充填混凝土“脆性”增加。

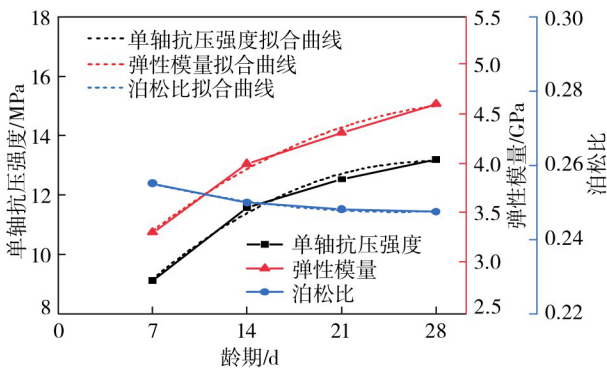


图7 不同龄期充填混凝土力学参数变化规律

Fig. 7 Variation of mechanical parameters of backfilling concrete at different ages

## 2.4 超声波参数分析

当混凝土中存在缺陷时, 如空洞、蜂窝、混凝土粘结不良等, 缺陷的声阻抗不同, 超声波穿过时会产生绕射或是反射现象, 一方面, 传播时间会不同程度地增大, 导致波速开始出现明显下降; 另一方面会使超声波发生一定的频散和衰减, 导致超声波频率和振幅减小。

### 2.4.1 超声波时频参数随龄期变化规律

对4种不同养护龄期的充填混凝土试件进行超声波测试, 设定超声波发射频率为140 kHz, 测试后通过式(2)得到4种龄期充填混凝土超声波波速值, 并采用Origin软件将超声波接收信号进行快速傅里叶变换(FFT), 得到不同龄期充填混凝土试件初始频谱, 频率最大值为主频值, 其对应的振幅为主频幅值。

超声波波速、主频幅值与龄期关系如式(2)和图8所示。

$$\begin{cases} v = 0.122 8 \ln(t) + 2.549 4 \\ A = 0.015 1t + 0.57 \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $v$  为波速, m/s;  $A$  为主频幅值, V。

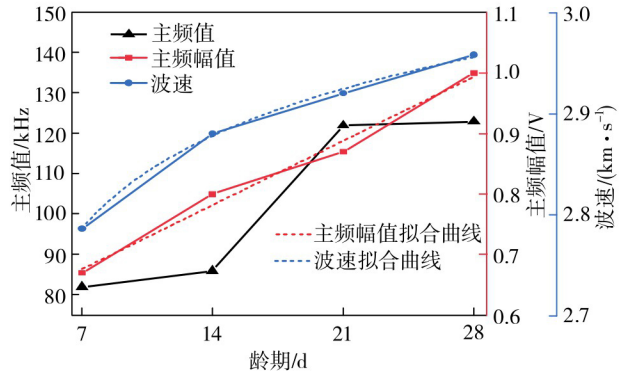


图8 充填混凝土超声波参数随龄期变化规律

Fig. 8 Variation of ultrasonic parameters of backfilling concrete with age

波速和主频幅值与龄期拟合曲线相关性系数分别为0.996 3, 0.987 3, 均大于0.987, 多项式函数式可以较好地表征超声波波速、主频幅值与龄期的关系。由式(2)和图8可知, 波速与龄期呈非线性递增关系, 主频幅值与龄期呈线性递增关系。随着龄期增长混凝土材料内水化产物逐渐增多, 由于水化过程导致混凝土材料内气孔减少, 内部微孔隙由初期分布广泛逐渐减少, 内部结构逐渐致密, 频散和衰减减弱, 导致超声波波速和主频幅值增大。

频率的变化是材料内部结构的综合表征, 当养护时间为7 d时, 超声波主频值为82 kHz, 远小于发射频率, 超声波衰减严重。随着龄期增长, 超声波主频值增大, 表明充填混凝土内部结构逐渐致密化, 同时28 d龄期时主频值为123.01 kHz, 未达到发射频率140 kHz, 说明28 d龄期时试件内部仍有一定的缺陷。

### 2.4.2 超声波主频幅值随应力变化规律

超声波主频幅值的变化特征可表征混凝土的损伤状态<sup>[25]</sup>, 主频幅值在单轴加载过程中的变化规律如图9所示。

由图9可知, 不同龄期混凝土试件加载过程中超声波主频幅值随应变变化规律均呈现出“小幅波动—持续上升—骤然下降”的趋势。通过对比4种龄期主频幅值变化, 峰值应力处主频幅值大小均随龄期增长而减小, 表明随着龄期增长, 试件裂隙

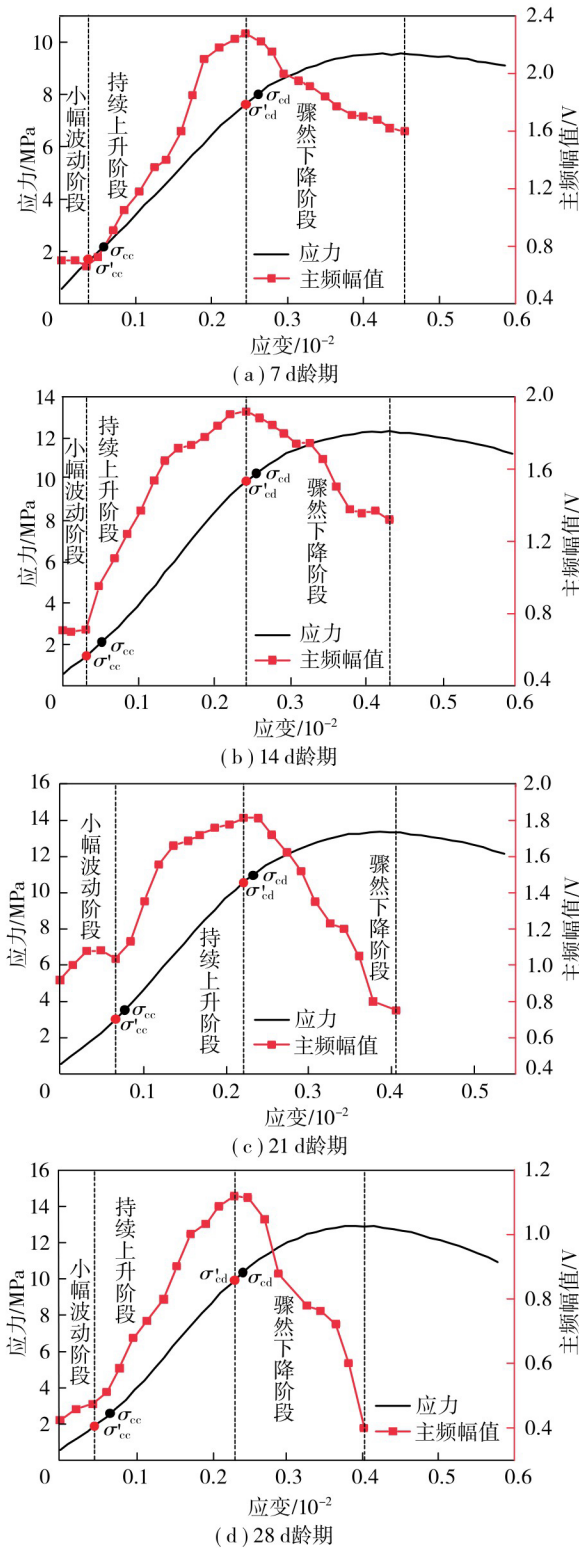


图9 基于主频幅值的特征应力确定

Fig. 9 Characteristic stress determination based on main frequency amplitude

发育越剧烈,破碎时裂隙越多,破碎程度越高,与电镜扫描分析结果吻合。以28 d龄期充填混凝土为例,根据主频幅值曲线变化规律,可将主频幅值在单轴压缩过程中的变化近似分为3个阶段:

小幅波动阶段:主频幅值由0.424 V增长到0.481 V,主频幅值有较小波动,这是由于初始压密阶段充填混凝土内部微孔隙逐渐闭合,超声波绕射或是反射现象减少。此时应力  $\sigma_a$  为15%峰值应力;

持续上升阶段:主频幅值由0.481 V增长到1.119 V。此阶段,充填混凝土内部裂隙开始萌生,但随着应力增加,裂隙不断重复着“萌生—压密—再发育”过程,主频幅值大幅增加直至峰值,此时应力  $\sigma_b$  为77%峰值应力;

骤然下降阶段:主频幅值由1.119 V减小到0.401 V。随着应力继续增大,充填混凝土内部裂隙与裂隙间逐渐贯通,宏观裂隙产生,超声波频散和衰减加强,主频幅值大幅下降。此阶段开始后,充填混凝土裂隙快速发育并逐渐贯通直至试件整体失稳破坏,则主频幅值由稳步上升到快速下降的转折点可作为试件失稳破坏的前兆信息。

2.4.3 基于超声波主频幅值的特征应力确定

根据2.4.2节中超声波主频幅值变化规律可知,在主频幅值变化的3个阶段内,充填混凝土内部裂隙发育程度有较大差异,基于此,定义峰前主频幅值由较小波动到稳步上升的转折点为裂隙闭合应力点  $\sigma'_{cc}$ ,稳步上升到快速下降的转折点为损伤应力点  $\sigma'_{cd}$ 。但需指出的是,由于制作过程中不可避免地人为导致不同试件内存在少许气泡,裂隙闭合应力点  $\sigma'_{cc}$  出现位置有较小差异,且由于未出现明显转折点,  $\sigma'_{cc}$  的确定仍存在一定主观性。基于超声波主频幅值定义的特征应力点见表3。

表3 基于主频幅值确定的特征应力点

Fig. 3 Characteristic stress points based on amplitude of main frequency

龄期/d	$\sigma_c$ /MPa	$\sigma'_{cc}$ /MPa	$\sigma'_{cc}/\sigma_c$	$\sigma'_{cd}$ /MPa	$\sigma'_{cd}/\sigma_c$
7	9.57	1.64	17%	7.64	80%
14	12.34	1.48	12%	9.88	80%
21	12.92	1.97	15%	9.95	77%
28	13.35	3.05	23%	10.60	79%
平均			17%		79%

基于超声波主频幅值确定的裂隙闭合应力点  $\sigma'_{cc}$  出现在12%~23%峰值应力处,损伤应力点  $\sigma'_{cd}$  出现在77%~80%峰值应力处。通过对比表2,超声波确定的特征应力点提前于应力-应变曲线确定的特征应力点并误差不大于5%,这是由于超声波表征的细观裂隙扩展超前于应变表征的宏观变形,可

见,超声波主频幅值可以较好地对巷旁充填混凝土裂隙扩展进行表征,表明了主频幅值的极大值点可以作为巷旁充填混凝土失稳破坏的前兆信息。

### 3 结论

(1) 通过单轴压缩试验和电镜扫描试验得出,随着龄期增长,充填混凝土材料单轴抗压强度和弹性模量单调递增,但增长速度渐减并趋向收敛,泊松比呈非线性递减,整体降低幅度较小,充填混凝土脆性增加。

(2) 随着养护时间的增长,充填混凝土试件内部水化产物增多,原始微孔洞逐渐密实,更利于超声波传播,体现在超声波参数变化上为波速、主频值和主频幅值逐渐增大。

(3) 单轴荷载下,充填混凝土超声波主频幅值呈现“小幅波动—持续上升—骤然下降”的变化趋势,可将单轴压缩过程分为3个阶段,主频幅值的极大值点可作为混凝土充填体破坏失稳前兆信息。

(4) 基于超声波主频幅值变化规律,提出利用主频幅值变化定义裂隙闭合应力点  $\sigma'_{cc}$  及损伤应力点  $\sigma'_{cd}$ ,超声波确定的特征应力点提前于应力-应变曲线确定的特征应力点并误差不大于5%。

### 参考文献(References):

[1] 刘听成. 无煤柱护巷的应用与进展[J]. 矿山压力与顶板管理, 1994, 11(4): 2-10, 80.  
LIU Tingcheng. Application and progress of coal pillarless roadway protection[J]. Mine Pressure and Roof Management, 1994, 11(4): 2-10, 80.

[2] 张吉雄, 姜海强, 缪协兴, 等. 密实充填采煤沿空留巷巷旁支护体合理宽度研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(2): 159-164.  
ZHANG Jixiong, JIANG Haiqiang, MIAO Xiexing, et al. The rational width of the support body of gob-side entry in fully mechanized backfill mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(2): 159-164.

[3] 张党育, 盖秋凯, 黄磊, 等. 工作面过废弃巷顶板微震时空演化机制及危险性分区[J]. 煤炭学报, 2021, 46(12): 3805-3818.  
ZHANG Dangyu, GAI Qiukai, HUANG Lei, et al. Temporal and spatial evolution mechanism and risk zoning of microseisms in working face passing through the roof of old roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(12): 3805-3818.

[4] 赵永, 杨天鸿, 张鹏海, 等. 基于微震参数的岩体损伤过程数值模拟分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(1): 213-220.  
ZHAO Yong, YANG Tianhong, ZHANG Penghai, et al. Numerical simulation of rock damage process based on microseismic parameters[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(1):

213-220.

[5] 邓维元, 康天合. 采空区下特厚煤层首采综放工作面顶板断裂的微震监测研究[J]. 煤矿安全, 2017, 48(4): 59-62.  
DENG Weiyuan, KANG Tianhe. Micro seismic monitoring research on roof fracture at the first fully mechanized mining face in special thick coal seam under goaf[J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(4): 59-62.

[6] 徐文彬, 王运敏, 党鹏, 等. 胶结充填体压缩破坏前兆多参数表征[J]. 岩土力学, 2016, 37(2): 399-406.  
XU Wenbin, WANG Yunmin, DANG Peng, et al. Precursors to compression failure of cemented backfill mass based on the multiparameter method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(2): 399-406.

[7] QI Tingye, FENG Guorui. Resistivity and AE response characteristics in the failure process of CGB under uniaxial loading[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2017, 2017: 1-11.

[8] WANG Jie, FU Jianxin, SONG Weidong, et al. Mechanical behavior, acoustic emission properties and damage evolution of cemented paste backfill considering structural feature[J]. Construction and Building Materials, 2020, 261(20): 119958.1-119958.16.

[9] 华心祝, 常贯峰, 刘啸, 等. 多源煤基固废充填体强度演化规律及声发射特征[J/OL]. 岩石力学与工程学报: 1-16[2022-04-13]. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2021.1264.  
HUA Xinzhu, CHANG Guanfeng, LIU Xiao, et al. Strength evolution law and acoustic-emission characteristics of multi-source, coal-based backfilling body of solid wastes[J/OL]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering: 1-16[2022-04-13]. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2021.1264.

[10] 郭育霞, 赵永辉, 冯国瑞, 等. 矽石胶结充填体单轴压缩损伤破坏尺寸效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(12): 2434-2444.  
GUO Yuxia, ZHAO Yonghui, FENG Guorui, et al. Study on damage size effect of cemented gangue backfill body under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(12): 2434-2444.

[11] CARRIÓN A, GENOVÉS V, GOSÁLBEZ J, et al. Ultrasonic signal modality: A novel approach for concrete damage evaluation[J]. Cement and Concrete Research, 2017, 101: 25-32.

[12] ALIREZA Sephehrinezhad, VAHAB Toufigh. The evaluation of distributed damage in concrete based on sinusoidal modeling of the ultrasonic response[J]. Ultrasonics, 2018, 89: 195-205.

[13] WU Jiangyu, FENG Meimei, NI Xiaoyan, et al. Aggregate gradation effects on dilatancy behavior and acoustic characteristic of cemented rockfill[J]. Ultrasonics, 2019, 92: 79-92.

[14] CAO Shuai, YILMAZ Erol, SONG Weidong, et al. Assessment of acoustic emission and triaxial mechanical properties of rock-cemented tailings matrix composites[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2019, 3: 1-12.

[15] 李为杜, 童寿兴, 马修麟. 混凝土超声检测信号频谱分析[J]. 无损检测, 1992, 14(4): 98-101.  
LI Weidu, TONG Shouxing, MA Xiulin. Signal spectrum analysis for

- ultrasonic testing of concrete[J]. *Nondestructive Testing*, 1992, 14(4): 98-101.
- [16] 肖楚珺, 崔博. 基于超声波透射法的碾压混凝土凝结过程监测研究[J]. *水利水电技术*, 2020, 51(7): 161-170.  
XIAO Chujun, CUI Bo. Study on monitoring of roller compacted concrete setting process based on ultrasound transmission method[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2020, 51(7): 161-170.
- [17] 杨昌民, 石冲, 苏胜昔, 等. 基于频谱分析和小波包熵值技术的压浆密实度检测与分析[J]. *建筑结构*, 2021, 51(16): 110-115.  
YANG Changmin, SHI Chong, SU Shengxi, et al. Detection and analysis of grouting compactness based on frequency spectrum analysis and wavelet packet entropy technology[J]. *Building Structure*, 2021, 51(16): 110-115.
- [18] 姚菲, 陆幸奇, 陈光宇. 基于冲击回波法的混凝土-围岩缺陷检测与信号处理研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2021, 18(9): 2316-2323.  
YAO Fei, LU Xingqi, CHEN Guangyu. Experimental and signal processing research on concrete-rock structural defects by impact-echo method[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2021, 18(9): 2316-2323.
- [19] 魏保立, 郭成超, 崔璨. 长寿命路面疲劳寿命预测的频域分析方法[J]. *中国工程科学*, 2017, 19(6): 80-85.  
WEI Baoli, GUO Chengchao, CUI Can. Fatigue life prediction of long-life pavement using frequency-domain analysis[J]. *Strategic Study of CAE*, 2017, 19(6): 80-85.
- [20] 许延春, 谢小锋, 李昆奇, 等. 基于超声波检测的岩体裂隙及注浆影响的试验研究[J]. *煤矿开采*, 2016, 21(2): 60-63, 82.  
XU Yanchun, XIE Xiaofeng, LI Kunqi, et al. Experimental studying on rock fractures and grouting influence based on ultrasonic testing[J]. *Coal Mining Technology*, 2016, 21(2): 60-63, 82.
- [21] 蒋雨宏. 基于非线性超声特性的混凝土损伤试验研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.  
JIANG Yuhong. Experimental research on the damage of concrete based on nonlinear ultrasonic characteristics[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2014.
- [22] 高昊, 郝文秀, 李梁, 等. 超声波法检测混凝土工作应力状态试验研究[J]. *建筑科学*, 2017, 33(3): 94-99.  
GAO Hao, HAO Wenxiu, LI Liang, et al. Experimental study of concrete work stress using ultrasonic testing[J]. *Building Science*, 2017, 33(3): 94-99.
- [23] 陈升平, 苏子豪. 不同类型混凝土单轴加载损伤的超声波法研究[J]. *湖北工业大学学报*, 2017, 32(5): 1-4.  
CHEN Shengping, SU Zihao. Ultrasonic wave study on uniaxial loading damage of different types of concrete[J]. *Journal of Hubei University of Technology*, 2017, 32(5): 1-4.
- [24] 丁自伟, 李小菲, 唐青豹, 等. 砂岩颗粒孔隙分布分形特征与强度相关性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(9): 1787-1796.  
DING Ziwei, LI Xiaofei, TANG Qingbao, et al. Study on correlation between fractal characteristics of pore distribution and strength of sandstone particles[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(9): 1787-1796.
- [25] YAN Baoxu, ZHU Wancheng, HOU Chen, et al. Characterization of early age behavior of cemented paste backfill through the magnitude and frequency spectrum of ultrasonic P-wave[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 249: 1-12.