

应力波作用下水平倾向液体充填岩石节理 动态响应规律试验

朱建波^{1,2}, 孔 骥^{1,2}, 黄震天^{1,2}, 孙家鑫^{1,2}, 吕岸霖³, 张 凯^{1,2}, 王加英⁴

(1. 深圳大学 广东省深地科学与地热能开发利用重点实验室, 广东 深圳 518060; 2. 深圳大学 土木与交通工程学院, 广东 深圳 518060;
3. 广西交建工程建设集团有限公司, 广西 南宁 530003; 4. 临沂市水利工程保障中心, 山东 临沂 276037)

摘 要: 地下岩体工程中, 液体充填岩石节理不可避免会受到地震、爆破等动力扰动。由于液体具有流动性, 不同倾向节理中的液体呈现不同空间分布状态, 受应力波扰动后液体的运动状态也相异。为阐明应力波作用下水平倾向液体充填岩石节理动态响应规律, 利用辉长岩切槽试样、有机玻璃管与丙三醇制备了液体充填岩石节理试样, 采用类霍普金森杆试验测试系统, 开展了液体充填岩石节理试样的竖向冲击加载试验, 考虑了节理匹配系数(J_{MC})、液体体积分数与黏度3个影响因素, 并从应力波透射能量与液体运动2个方面分析了液体充填岩石节理动态响应规律。试验结果表明: 液体充填岩石节理 J_{MC} 增大, 应力波透射能量增大; 随着液体体积分数增大, 高幅低频应力波的透射能量单调增大, 低幅高频应力波的透射能量先不变后增大; 当液体体积分数为50%时, 应力波透射能量随着液体黏度增大而减小, 而当液体体积分数为100%时, 应力波透射能量随着液体黏度增大呈现先减小后增大的趋势; 节理边界处, 液体运动方向垂直于水平节理面向上, 节理排液能力和液体运动剧烈程度随液体黏度增大而减弱。

关键词: 应力波; 液体充填; 岩石节理; 动态响应; 透射能量; 液体运动

中图分类号: TU45 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2024)04-1873-09

Experimental investigation of dynamic response of liquid-filled rock joints with horizontal inclination under stress wave loading

ZHU Jianbo^{1,2}, KONG Ji^{1,2}, HUANG Zhentian^{1,2}, SUN Jiaxin^{1,2}, LÜ Anlin³, ZHANG Kai^{1,2}, WANG Jiaying⁴

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Deep Earth Sciences and Geothermal Energy Exploitation and Utilization, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 2. College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 3. Guangxi Jiaojian Engineering Construction Group Co., Ltd., Nanning 530003, China; 4. Linyi Water Conservancy Engineering Support Center, Linyi 276037, China)

Abstract: In underground rock engineering, the liquid-filled rock joints are inevitably subjected to dynamic disturbances such as earthquakes and blasting. The fluidity of liquids leads to distinct spatial distribution patterns within inclined joints under the influence of gravitational forces, while the motion characteristics of liquids are altered upon encountering stress waves. This study aimed to investigate the dynamic response of liquid-filled rock joints with horizontal inclination when subjected to stress wave loading. The rock joint specimens filled with liquid were prepared using the gouged samples of

收稿日期: 2023-11-14 修回日期: 2024-01-28 责任编辑: 王 凡 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.1525

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFC3004602); 国家自然科学基金资助项目(52325404); 深圳市基础研究资助项目(JCYJ20220818095605012)

作者简介: 朱建波(1983—), 男, 山东临沂人, 教授, 博士生导师。E-mail: jianbo.zhu@szu.edu.cn

通讯作者: 孔 骥(1998—), 男, 湖南湘西人, 博士研究生。E-mail: kongji2021@email.szu.edu.cn

引用格式: 朱建波, 孔骥, 黄震天, 等. 应力波作用下水平倾向液体充填岩石节理动态响应规律试验[J]. 煤炭学报, 2024, 49(4): 1873-1881.

ZHU Jianbo, KONG Ji, HUANG Zhentian, et al. Experimental investigation of dynamic response of liquid-filled rock joints with horizontal inclination under stress wave loading[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(4): 1873-1881.



移动阅读

diorite, polymethyl methacrylate tubes, and glycerol. Experimental tests were conducted using a modified Split Hopkinson Pressure Bar testing system on jointed rock specimens filled with liquid. Three influencing factors, namely, the joint matching coefficient (J_{MC}), liquid content, and viscosity, were considered. The dynamic response of liquid-filled joints was analyzed based on the transmitted energy of stress waves and liquid motion. The results indicated that an increase in J_{MC} of the liquid-filled rock joints leads to a higher transmission of stress wave energy. As the fluid content increases, the transmission energy of high-amplitude, low-frequency stress waves shows a monotonic increase, while that of low-amplitude, high-frequency waves initially remains constant, followed by an increase. When the liquid content is 50%, the transmission of stress wave energy decreases with increasing liquid viscosity. However, when the liquid content is 100%, the transmission energy shows a trend of initially decreasing and then increasing with increasing liquid viscosity. At the joint boundaries, the direction of fluid motion is perpendicular to the horizontal joint plane and upward. Both the drainage capacity of the joint and the intensity of fluid motion diminish with increasing fluid viscosity. These findings provide some valuable insights into the interaction mechanism between stress waves and liquid-filled rock joints, contributing to a deeper understanding of this phenomenon.

Key words: stress wave; liquid-filled; rock joints; dynamic response; transmitted energy; liquid motion

长期地质作用下,液体充填岩石节理普遍存在于自然界^[1]。现有研究表明,液体存在明显影响应力波与节理的相互作用^[2]。尤其在爆破与地震等强动载作用下,液体充填岩石节理易发生破坏,是造成地下流体-动力耦合灾害的重要原因^[3-4]。因此,明确应力波作用下液体充填岩石节理动态响应规律对地下工程建设具有重要意义^[5-7]。

目前主要采用理论和试验方法研究应力波作用下岩石节理动态响应规律。理论方面主要基于位移不连续理论^[8](DDT)与层状介质理论^[9](LMT)。学者们将2种理论与不同节理本构模型结合,进行了理论分析。例如, PYRAK N J等^[10]结合 DDT 与线弹性节理模型,分析了无充填岩石节理动态响应规律;朱建波等^[11]结合 LMT 与 Kelvin 和 Maxwell 模型,分析了黏弹性充填岩石节理动态响应规律;还有学者^[12-16]结合2种理论与非线性节理本构模型,分析了岩石节理非线性动态响应规律。然而由于液体流动性,理论方法不能较好反映液体充填岩石动态响应规律。

试验方法主要基于声波仪与 SHPB 及其改进装置。基于声波仪装置,KAHRAMAN^[17-18]研究了 P 波波速与节理数量、施密特锤回弹数以及节理粗糙度间的相关性,发现波速随节理数量、粗糙度增加而降低;PLACE 等^[19]研究了 P 波在充填流体(空气、水和2种不同水泥体积分数水泥浆)人工节理中的透、反射规律,发现流体类型对反射波频谱和能量有很大影响,内部流体流动对波反射影响可忽略不计,透射波能量随充填液体水泥浓度升高而升高;杨慧等^[2,20-21]研究了 P 波在液体充填岩石节理中的传播规律,揭示了液体体积分数、液体黏度、节理厚度和温度等对 P 波传播的影响规律。然而相较实际工况下的冲击应力波,超声波幅值小、频率高、波长短,不能反映冲击应力波

作用下岩石节理动态响应规律。

因此学者们又基于 SHPB 及其改进装置探究了应力波作用下岩石节理动态响应规律。李建春等^[22-24]研究了节理的匹配系数、接触面相对密集度、厚度以及冲头速率对非充填岩石节理应力波传播的影响;吴为等^[25-27]研究了加载率、节理厚度与含水率对固体充填岩石节理中应力波传播的影响;杨慧等^[28]研究了液体体积分数、黏度与节理厚度对液体充填岩石节理应力波传播的影响,发现应力波能量透射系数随液体体积分数的增加而增加;刘晓丽等^[3,29]结合辅助充液装置,研究了液体充填岩石节理动态响应规律,发现应力波能量透射系数随节理倾角($0^\circ \sim 30^\circ$)、厚度增加而减小,液体峰值压力随节理倾角($0^\circ \sim 30^\circ$)增加而增加。然而,目前缺乏应力波作用下水平倾向液体充填岩石节理动态响应规律的研究。

由于液体流动性,倾向明显影响液体充填岩石节理动态响应规律。应力波扰动前,不同倾向节理中液体空间分布状态不同;应力波扰动后,不同倾向节理中液体运动状态相异。其中竖直、水平倾向液体充填节理具有代表性,如图1所示。故针对水平倾向液体充填岩石节理,开展应力波作用下其动态响应规律研究。利用辉长岩试样、有机玻璃管与丙三醇制备液体充填岩石节理试样,考虑 J_{MC} ^[30-31](节理匹配系数)、液体体积分数与黏度3个影响因素,采用类 SHPB 试验测试系统进行竖向冲击加载,并从应力波透射能量与液体运动2个方面分析液体充填岩石节理动态响应规律。

1 试验方法

1.1 试样制作

岩石选用山西辉长岩,首先制备32个圆柱形试

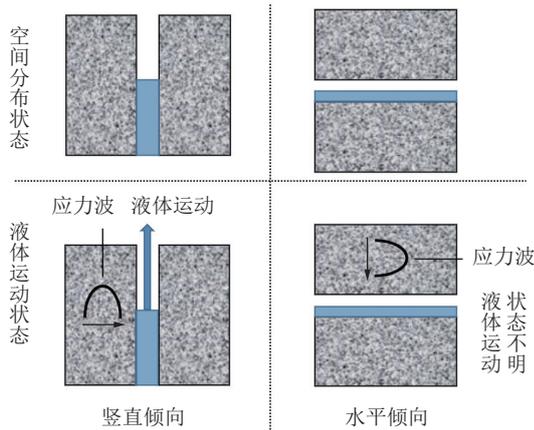


图1 不同倾向液体充填岩石节理对比

Fig.1 Comparison of liquid filled rock joints with different orientations

样,尺寸为 $\phi 50\text{ mm}\times 25\text{ mm}$,两端平整度小于 0.02 mm ^[32],如图2(a)所示。然后利用数控切割机对16个圆柱形试样一端进行切槽,形成 J_{MC} 分别为0.505、0.443、0.255、0.130的4种切槽试样(槽深均为4 mm),如图2(c)所示。

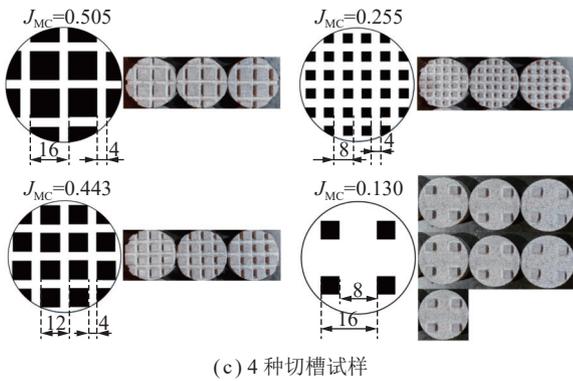
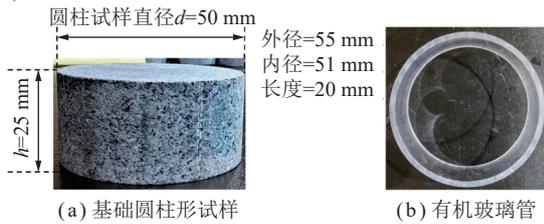


图2 液体充填岩石节理试样制备材料

Fig.2 Liquid-filled rock joint specimen preparation materials

如图3(a)所示,使用环氧树脂胶将图2(b)所示有机玻璃管与切槽试样黏结,有机玻璃管顶端微高于切槽试样凸面。具体黏结过程如下,首先将试样非切槽面缠上透明胶带(保护非切槽面),如图3(b)所示,再将试样切槽面朝上放置(重力作用使未凝固的环氧树脂胶不会渗入切槽面),然后将稍过量(保证环氧树脂胶充满有机玻璃管与试样间缝隙)环氧树脂胶涂抹于试样壁面,黏结有机玻璃管,待环氧树脂胶凝固后,再将其于阴凉、干燥环境下静置48 h,使环氧树脂胶完全固化。

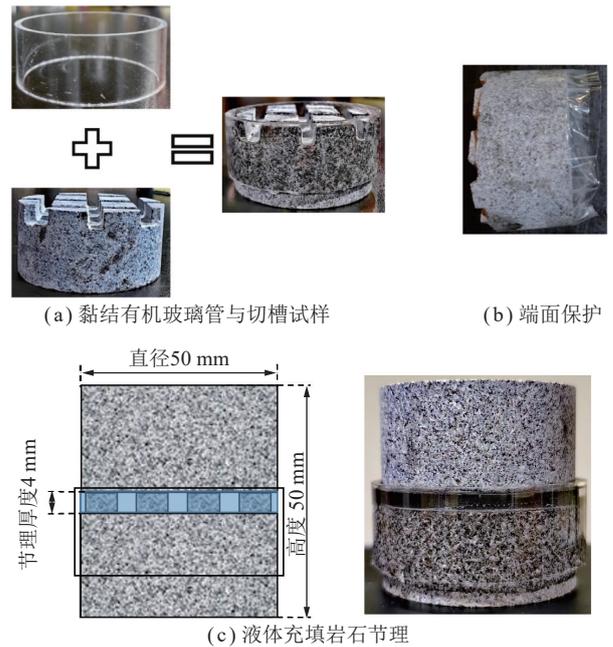


图3 液体充填岩石节理制备过程

Fig.3 Preparation process of liquid filled rock joints

最后将黏结有机玻璃管切槽试样与圆柱形试样上下组合,并充填液体,即形成液体充填岩石节理,如图3(c)所示。

1.2 充填液体

试验准备了3种不同黏度液体:W液体、WG液体、G液体。黏度由中沪仪昕数字式黏度计测得,如图4所示,3种液体具体物理参数见表1。



图4 数字式黏度计

Fig.4 Digital viscometer

1.3 试验装置

西南石油大学自制类SHPB试验测试系统如图5所示。由氮气源、伺服电机等组成动力系统,由LK2107A系列超动态应变仪、RIGOL数字示波器、

表 1 试验所用液体具体参数 (室温: 20 °C)

Table 1 Specific parameters of the liquid used in the experiment (room temperature: 20 °C)

充填液体	液体组成	密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	黏度 $\eta/(MPa \cdot s)$
W	100%去离子水 无丙三醇	0.996	1.0
WG	25%去离子水 75%丙三醇	1.198	40.8
G	无去离子水 100%丙三醇	1.250	620.5

计算机等组成信号采集系统,由发射管、冲锤、入射杆、透射杆、横梁等组成主体机架。冲锤、入射杆和透射杆材料均为 40 Cr,泊松比为 0.277,弹性模量为 211 GPa,密度为 7.87 kg/m³,屈服强度为 785 MPa,纵波波速为 5 410 m/s;冲锤长度为 160 mm,直径为 50 mm,质量为 2.5 kg;入射杆长度为 500 mm,透射杆长度为 840 mm,两杆直径均为 50 mm。试样置于入射杆与透射杆之间,冲锤撞击入射杆后形成入射波,部分入射波在试样上端面反射形成反射波,另有部分入射波透射过试样形成透射波。贴在入射杆、透射杆上的应变片采集入射波、反射波和透射波信号,并接入信号采集系统。

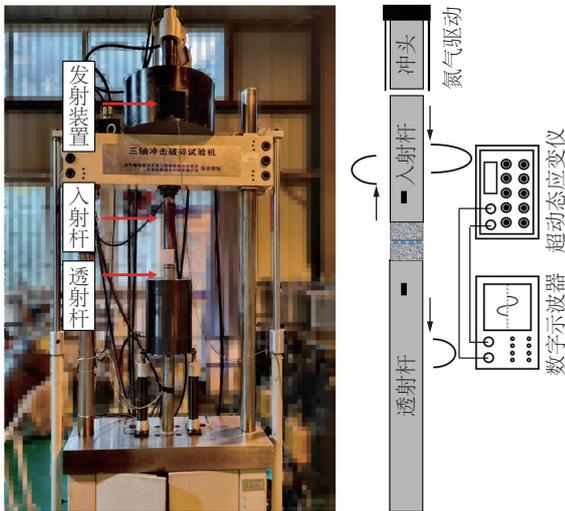


图 5 类 SHPB 试验测试系统

Fig.5 Modified split hopkinson pressure bar

1.4 试验步骤

研究分 2 个部分: ① J_{MC} 、液体体积分数对液体充填岩石节理动态响应影响研究; ② 液体黏度与体积分数对液体充填岩石节理动态响应影响研究。2 个部分试验均考虑了 3 种液体 (W、WG 和 G) 在 0、50%、100% 等体积分数下的充填情况。其中液体体积分数指液体占全部节理空间体积百分比,实际操作由液体层厚度占节理厚度百分比决定,如图 6 所示。

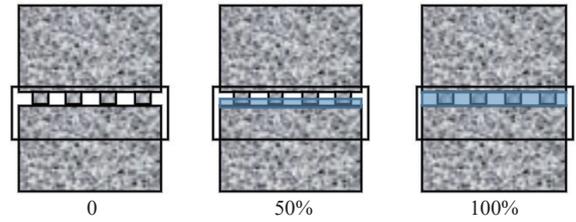


图 6 3 种液体体积分数

Fig.6 Three liquid contents

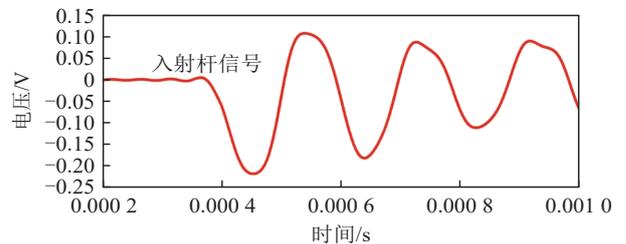
第 1 部分选用 J_{MC} 为 0.505、0.433、0.255 等 3 种共 9 个组合试样。将 3 个 J_{MC} 为 0.505 组合试样依次充填 0、50%、100% 液体 W,通过类 SHPB 试验测试系统对每个液体充填节理试样进行 3 次竖向加载,加载气压 0.04 MPa(0.04 MPa 为预实验挑选的无损冲击气压)。信号采集系统记录入射、反射与透射波,工业相机 (120 fps) 拍摄液体运动过程。 J_{MC} 为 0.433、0.255 组合试样过程同上。

第 2 部分选用 7 个 J_{MC} 为 0.130 组合试样。7 个组合试样依次充填 0、50%、100% 液体 W,50%、100% 液体 WG,50%、100% 液体 G,通过类 SHPB 试验测试系统对每个液体充填节理试样进行 3 次竖向加载,加载气压 0.04 MPa。信号采集系统记录入射、反射与透射波,工业相机 (120 fps) 拍摄液体运动过程。

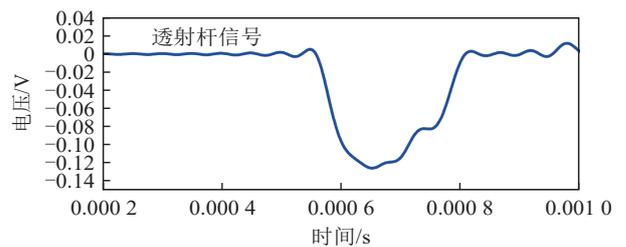
2 试验结果与讨论

2.1 数据处理

图 7 分别为信号采集系统记录入射杆与透射杆上电位-时间波形。如图 7 所示,采集的入射波与反射波相重叠,但能记录完整透射波波形。这是由于相较标准 SHPB 系统,此类 SHPB 试验测试系统入射



(a) 入射、反射波重叠波形



(b) 透射波波形

图 7 信号采集系统记录波形

Fig.7 Waveform recorded by the signal acquisition system

杆较短, 导致入射波与反射波重叠。入射波在入射杆中已经多次反射与叠加, 分波法^[33]不能准确分离入射波与反射波, 所以本次试验仅分析透射波。为确保入射能量一致, 试验严格控制冲击气压为0.04 MPa, 结合一维应力波理论, 通过式 (1) 计算应力波透射能量 E_1 为

$$E_1 = \frac{cA}{E} \int_0^\tau \sigma_t^2 dt = cAE \int_0^\tau \varepsilon_t^2 dt \quad (1)$$

其中, c 、 A 、 E 分别为透射杆纵波波速、截面面积和弹性模量; σ_t 、 ε_t 为透射杆应力和应变; τ 为应力波延续时间。而后分析应力波透射能量变化规律与液体运动, 得出应力波作用下不同 J_{MC} 、液体体积分数与黏度的水平倾向液体充填岩石节理动态响应规律。

2.2 透射能量分析

2.2.1 J_{MC} 与液体体积分数影响

不同液体体积分数下 J_{MC} 对透射能量影响规律如图 8(a) 所示, 同一液体体积分数, 透射能量随着 J_{MC} 增大而增大, 其中无液体充填结果与 LI 等^[22] 试验结果一致。这是由于节理刚度随着 J_{MC} 增大而增大, 节理刚度增大导致应力波透射能量增大^[10]; 且阻抗匹配度也随着 J_{MC} 的增大而增大, 阻抗匹配度增大同样导致应力波透射能量增大。

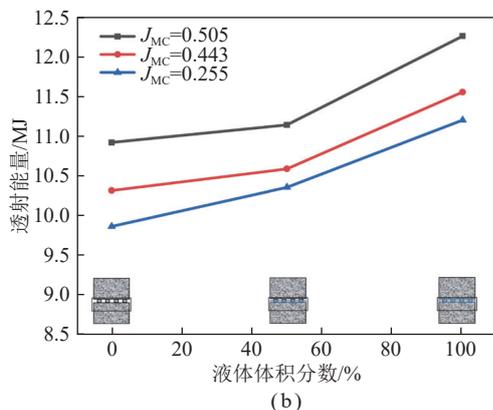
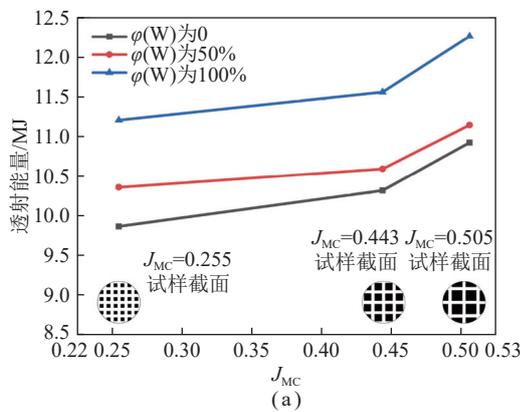


图 8 J_{MC} 液体体积分数对透射能量影响

Fig.8 Effect of J_{MC} and liquid content on transmitted energy

不同 J_{MC} 情况下液体体积分数对透射能量影响如图 8(b) 所示, 同一 J_{MC} , 透射能量随着液体体积分数增大而增大。同理, 节理刚度、阻抗匹配度随着液体体积分数增大而增大, 导致应力波透射能量增大。

据 YANG 等^[2] 试验结果, 50% 及以下液体体积分数对超声波透射系数无影响 (都接近于 0), 而当液体体积分数大于 50% 时, 超声波透射系数随着液体体积分数增大而增大。表明对于水平倾向液体充填岩石节理, 50% 及以下液体体积分数不能增大超声波透射能量。两者不同是由冲击应力波与超声波的特性差异导致, 如图 9 所示。首先相较超声波, 冲击应力波频率低、波长长, 具备更强传播能力。本次试验频率约 4 kHz, YANG 等^[2] 试验中 2 种超声波频率分别为 0.1、1 MHz, 约为本次试验频率 25、250 倍, 介质波衰减速度将随频率增大而加快, 因为同等传播路径下高频振动次数更多, 导致传播过程中的能量损耗增大; 同样本次试验冲击应力波波长约为上述两种超声波的 25、250 倍, 介质波绕射能力将随波长增大而增大。其次冲击波幅值高, 具备更高初始能量。因此当液体体积分数为 50% 及以下时, 冲击应力波能顺利通过, 而超声波大部分不能抵达液面线。由上分析可知, 液体体积分数对应应力波透射能量影响与应力波幅值、频率、波长密切相关。

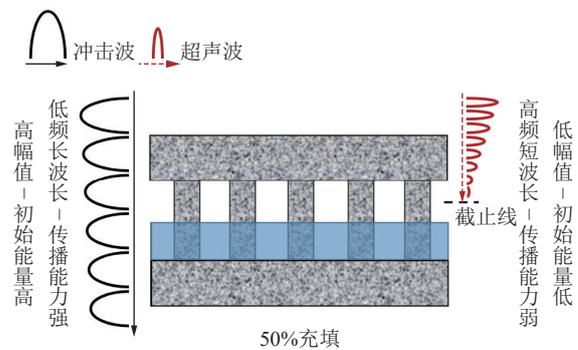


图 9 冲击波与超声波经过液体充填节理时的区别

Fig.9 Difference between shock wave and ultrasonic wave when passing through liquid filled joints

但对于竖直倾向液体充填岩石节理, 因为其液体空间分布状态不同于水平倾向 (图 1), 超声波、冲击应力波二者透射能量都随着液体体积分数的增加而增加^[28]。

2.2.2 液体黏度与体积分数影响

不同液体黏度情况下液体体积分数对透射能量影响如图 10(a) 所示, 同一液体黏度, 透射能量随着液体体积分数增大而增大, 原因如 2.2.1 节所述, 节理刚度、阻抗匹配度随着液体体积分数增大而增大, 导致应力波透射能量增大。

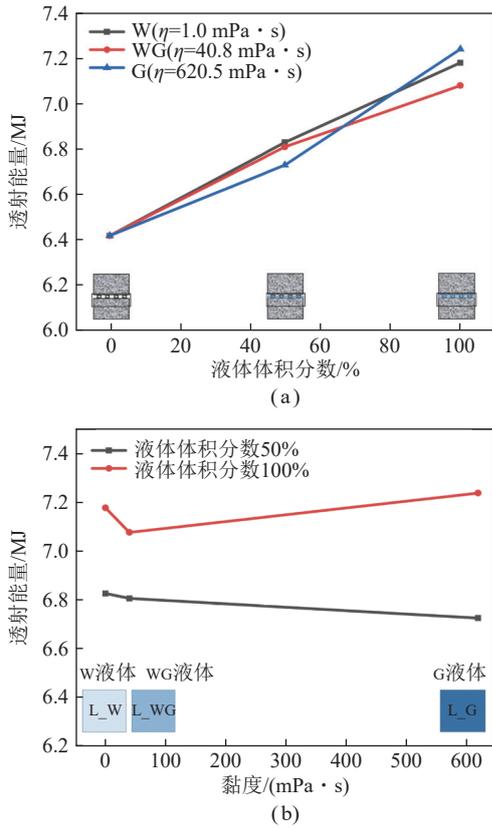


图 10 液体黏度对透射能量影响

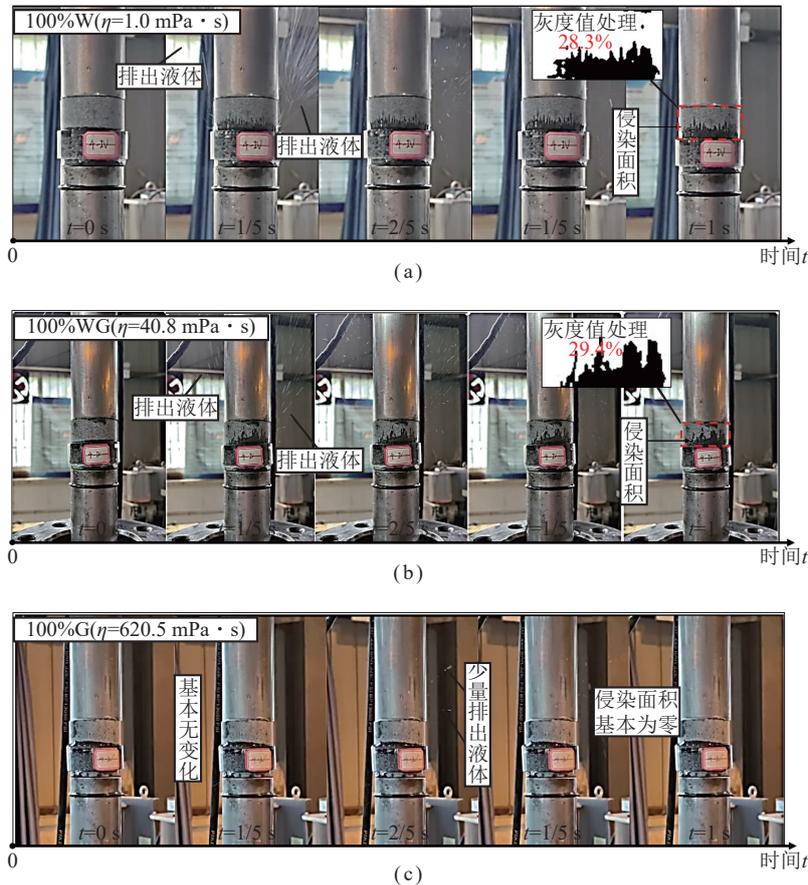
Fig.10 Effect of liquid viscosity on transmitted energy

液体黏度对透射能量影响如图 10(b) 所示, 当液体体积分数为 50% 时, 透射能量随着液体黏度的增大而减小; 当液体体积分数为 100% 时, 随着液体黏度增大, 透射能量先减小后增大。这是由于节理刚度与黏性摩擦均随着液体黏度增大而增大^[28], 而透射能量随着节理刚度增大而增大, 随着黏性摩擦增大而减小。50% 液体体积分数充填时, 随着液体黏度增大, 黏性摩擦影响占据主导作用; 100% 液体体积分数充填时, 随着液体黏度增大, 黏性摩擦影响先占据主导作用, 后节理刚度影响占据主导作用。

由图 10 可知, 液体黏度由 $42.8 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 增至 $620.5 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, 相比于 50% 液体体积分数, 100% 液体体积分数充填节理的排量减少程度更大, 而液体排出导致节理刚度下降, 因此 100% 液体体积分数充填节理的节理刚度增大程度大于 50% 液体体积分数充填节理。

2.3 液体运动分析

节理中液体运动过程如图 11 所示, 并选用液体运动停止图进行灰度值处理, 评估了 100%W、100%WG、50%W 及 50%WG 液体充填时, 上半试样的液体侵染面积占比, 分别为 28.3%、29.4%、5.4% 及 4.1%。节理边界处, 液体运动方向垂直于水平节理面向上, 这是由于受应力波压缩作用, 液体压力骤然增



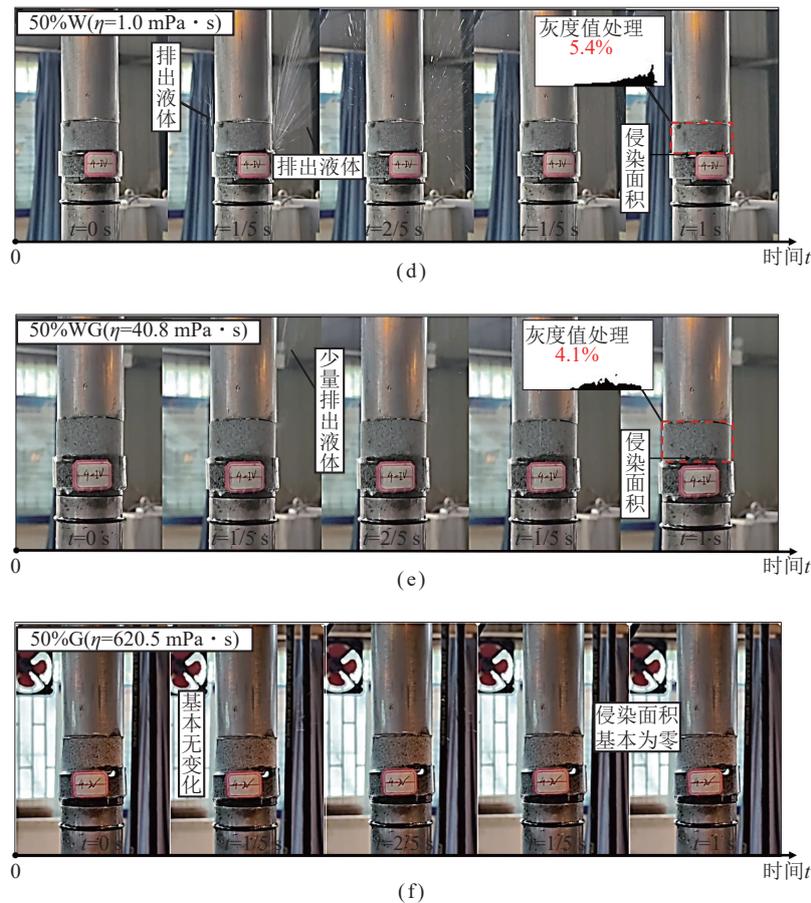


图 11 节理中液体运动过程

Fig.11 Process of liquid movement in joints

大,与上部低压空气区形成了压力差。

50% 液体体积分数充填时,随着液体黏度增大,排出液体,液体侵染面积都逐渐减少。100% 液体体积分数充填时,黏度由 $1 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 增至 $42.8 \text{ mPa} \cdot \text{s}$,液体侵染面积微弱增加,但排出液体大量减少;黏度由 $42.8 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 增至 $620.5 \text{ mPa} \cdot \text{s}$,液体侵染面积、排出液体都大量减少。表明随着液体黏度增大,节理排液能力与液体运动剧烈程度逐渐减弱,这是由于每次冲击的输入气压一定,而黏度的增大使得液体分子间摩擦力增大,液体的流动性大大减弱。

随着液体体积分数增大,W、WG 液体充填时,排出液体、上半试样被液体侵染面积显著增加;G 液体充填时,排出液体微弱增加,上半试样基本都未被侵染。表明节理排液能力随着液体体积分数增大而增大,但增大程度随着液体黏度增大而降低。这是由于随着液体体积分数增大,节理中空隙体积减小,液体压力直接朝节理外释放,且随着液体黏度增大,液体流动性减弱。

节理液体运动是液体充填岩石节理动态响应规律的重要组成部分。应力波诱发液体运动,同时,液

体运动也影响应力波传播。如 2.2.2 节所述,不同液体体积分数下,液体黏度对应力波透射能量影响不同,其原因是节理排液能力的变化;且根据能量守恒,液体运动会消耗一定的应力波能量。但应力波传播和液体运动规律具体对应关系的进一步明确,需通过改进加载设备、监测手段等方法实现。

地热开采工程、石油工程及碳封存工程等实际工程都涉及富含流体地层,其不可避免会遭受动载扰动,进而引起流体场重分布,甚至诱发流体-动力耦合灾害。明确节理液体运动规律对涉及富含流体地层工程的安全建设具有重要意义。

3 结 论

(1) 随着 J_{MC} 增大,应力波透射能量增大。应力波幅值、频率、波长不同,液体体积分数对其透射能量影响不同:对于高幅、低频、长波长应力波,随着液体体积分数增大,应力波透射能量单调增大;而对于低幅、高频、短波长应力波,随着液体体积分数增大,应力波透射能量先不变后增大。

(2) 液体体积分数不同,液体黏度对应力波透射能

量影响不同:当液体体积分数为50%时,随着液体黏度增大,应力波透射能量减小;当液体体积分数为100%时,随着液体黏度增大,应力波透射能量先减小后增大。

(3) 节理边界处,液体运动方向垂直于水平节理面向上。随着液体黏度增大,节理排液能力与液体运动剧烈程度明显下降。随着液体体积分数增大,节理排液能力增大,且增大程度随着液体黏度增大而降低。

参考文献(References):

- [1] VISWANATHAN H S, AJOFRANKLIN J, BIRKHOLZER J T, et al. From fluid flow to coupled processes in fractured rock: Recent advances and new frontiers[J]. *Reviews of Geophysics*, 2022, 60(1): e2021RG000744.
- [2] YANG H, DUAN H F, ZHU J B. Effects of filling fluid type and composition and joint orientation on acoustic wave propagation across individual fluid-filled rock joints[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 128: 04248.
- [3] HUANG J, LIU X L, SONG D Q, et al. Laboratory-scale investigation of response characteristics of liquid-filled rock joints with different joint inclinations under dynamic loading[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2022, 14(2): 396–406.
- [4] 孙欢, 刘晓丽, 王恩志, 等. 岩石破裂过程中裂隙流体 X 射线造影试验及应用[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2021, 61(8): 778–791. SUN Huan, LIU Xiaoli, WANG Enzhi, et al. X-ray radiography for visualization of fissure fluid flows during rock failures[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2021, 61(8): 778–791.
- [5] COOK N G W. Natural joints in rock: Mechanical, hydraulic and seismic behaviour and properties under normal stress[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1992, 29(3): 198–223.
- [6] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(16): 2803–2813. HE Manchao, XIE Heping, PENG Suping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(16): 2803–2813.
- [7] 朱建波, 马斌文, 谢和平, 等. 煤矿矿震与冲击地压的区别与联系及矿震扰动诱冲初探[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(9): 3396–3409. ZHU Jianbo, MA Binwen, XIE Heping, et al. Differences and connections between mining seismicity and coal bursts in coal mines and preliminary study on coal bursts induced by mining seismicity[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(9): 3396–3409.
- [8] MINDLIN R. Waves and vibrations in isotropic, elastic plates[J]. *Structure Mechanics*, 1960: 199–232.
- [9] THOMSON W T. Transmission of elastic waves through a stratified solid medium[J]. *Journal of Applied Physics*, 1950, 21(2): 89–93.
- [10] PYRAK N J, MYER L R, COOK N G W. Transmission of seismic waves across single natural fractures[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1990, 95(B6): 8617–8638.
- [11] ZHU J B, PERINO A, ZHAO G F, et al. Seismic response of a single and a set of filled joints of viscoelastic deformational behaviour[J]. *Geophysical Journal International*, 2011, 186(3): 1315–1330.
- [12] LI J C, WU W, LI H B, et al. A thin-layer interface model for wave propagation through filled rock joints[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2013, 9: 31–38.
- [13] MILLER R K. The effects of boundary friction on the propagation of elastic waves[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1978, 68(4): 987–998.
- [14] ZHAO J, CAI J G. Transmission of elastic P-waves across single fractures with a nonlinear normal deformational behavior[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2001, 34(1): 3–22.
- [15] CUI Z, SHENG Q, LENG X L. Analysis of S wave propagation through a nonlinear joint with the continuously yielding model[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2017, 50(1): 113–123.
- [16] 刘婷婷, 李建春, 李海波, 等. 应力波通过非线性平行节理的能量分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(8): 1610–1617. LIU Tingting, LI Jianchun, LI Haibo, et al. Energy analysis of stress wave propagation across parallel nonlinear joints[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(8): 1610–1617.
- [17] KAHRAMAN S. A correlation between P-wave velocity, number of joints and Schmidt hammer rebound number[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2001, 38(5): 729–733.
- [18] KAHRAMAN S. The effects of fracture roughness on P-wave velocity[J]. *Engineering Geology*, 2002, 63(3–4): 347–350.
- [19] PLACE J, GHAFAR A N, MALEHMIR A, et al. On using the thin fluid-layer approach at ultrasonic frequencies for characterising grout propagation in an artificial fracture[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2016, 89: 68–74.
- [20] YANG H, DUAN H F, ZHU J B. Ultrasonic P-wave propagation through water-filled rock joint: An experimental investigation[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2019, 169: 1–14.
- [21] YANG H, DUAN H F, ZHU J B. Thermal effect on compressional wave propagation across fluid-filled rock joints[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, 54(1): 455–462.
- [22] LI J C, LI N N, LI H B, et al. An SHPB test study on wave propagation across rock masses with different contact area ratios of joint[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 105: 109–116.
- [23] LI J C, RONG L F, LI H B, et al. An SHPB test study on stress wave energy attenuation in jointed rock masses[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52(2): 403–420.
- [24] 李娜娜, 李建春, 李海波, 等. 节理接触面对应力波传播影响的 SHPB 试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(10): 1994–2000. LI Nana, LI Jianchun, LI Haibo, et al. SHPB experiment on influence of contact area of joints on propagation of stress wave[J].

- Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(10): 1994–2000.
- [25] WU W, LI J C, ZHAO J. Loading rate dependency of dynamic responses of rock joints at low loading rate[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2012, 45(3): 421–426.
- [26] WU W, ZHU J B, ZHAO J. Dynamic response of a rock fracture filled with viscoelastic materials[J]. *Engineering Geology*, 2013, 160: 1–7.
- [27] WU W, ZHAO J. Effect of water content on P-wave attenuation across a rock fracture filled with granular materials[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, 48(2): 867–871.
- [28] YANG H. Fluid effects on the interaction of waves with rock joints[D]. Hongkong: The Hong Kong Polytechnic University, 2021.
- [29] HUANG J, LIU X L, ZHAO J, et al. Propagation of stress waves through fully saturated rock joint under undrained conditions and dynamic response characteristics of filling liquid[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53(8): 3637–3655.
- [30] ZHAO J. Joint surface matching and shear strength part A: Joint matching coefficient (JMC)[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, 34(2): 173–178.
- [31] ZHAO J. Joint surface matching and shear strength part B: JRC-JMC shear strength criterion[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, 34(2): 179–185.
- [32] ZHOU Y X, XIA K W, 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.
- [33] LI J C, MA G W. Experimental study of stress wave propagation across a filled rock joint[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2009, 46(3): 471–478.