

文章编号: 1001-4888(2019)06-1068-09

弱围压与垂直冲击强扰动下 块系岩体超低摩擦效应试验研究^{*}

李利萍¹, 鞠翔宇¹, 潘一山², 王淋³, 邵英楼¹

(1. 辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁阜新 123000; 2. 辽宁大学 物理学院, 辽宁沈阳 110036;

3. 大连海事大学 交通运输工程学院, 辽宁大连 116000)

摘要: 随开采深度增加, 深部岩体结构趋于破碎, 临近工作面待开采岩体受弱围压作用, 遇冲击载荷强扰动时, 易诱发超低摩擦型冲击地压。采用自主研发的弱围压块系岩体超低摩擦模拟试验装置, 以5个上下叠加花岗岩块体模拟深部临近工作面破碎岩体, 通过螺栓加载方式对块系岩体施加弱围压作用、垂直方向施加冲击载荷作用模拟强扰动。以垂直加速度差值变化作为超低摩擦效应强度特征参数, 分析得到了冲击载荷强度、围压对块系岩体超低摩擦效应影响规律。研究表明: 垂直冲击载荷作用下, 块系岩体振动分为受迫振动和自由振动两个阶段, 随冲击载荷增大, 块体垂直加速度差值峰值增大, 垂直加速度差值衰减时间延长, 此时超低摩擦效应强度和持续时间均显著增加; 围压与冲击载荷共同作用下, 存在围压临界值使得超低摩擦效应强度达到最大; 随围压增加, 超低摩擦效应最大强度发生时刻提前, 当试验围压达到最大值时, 超低摩擦效应最大强度发生时刻趋于一致。

关键词: 超低摩擦效应; 弱围压; 垂直冲击载荷; 冲击地压; 块系岩体

中图分类号: TU45

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-18-092

0 引言

随着浅部资源逐步减少和枯竭, 使得我国越来越多矿山进入到深部开采^[1-4], 岩爆、顶板大面积受压与冒落、底板突水、煤与瓦斯突出、冲击地压等动力灾害频度和强度显著增加, 其中超低摩擦效应成为了深部岩体工程响应的新动力特征科学现象之一。

超低摩擦效应是指当强动载作用于深部岩块系统时, 大部分冲击能量转化为不同尺寸等级地质块体动能, 引起岩块系统振动, 岩石间相对压紧程度随时间发生变化。当冲击作用能量达到临界值时, 岩块间处于相对疏松状态、摩擦力大大降低, 甚至在相互作用的块系接触界面间产生摩擦“消失”效应^[5-7]。

岩体超低摩擦效应理论最早由俄罗斯学者 Kurlenya 和 Oparin^[8,9] 提出并采用试验方法对超低摩擦效应进行了验证与解释。钱七虎^[10] 院士指出了岩块块系中存在超低摩擦现象并认为其是深部开采中的关键科学问题。王洪亮^[11] 等在俄罗斯学者建立的块体模型基础上, 初步揭示了超低摩擦现象内在机制。李利萍^[12] 等基于塑性动力学理论建立岩体超低摩擦效应简支梁模型, 从塑性动力学角度解释了岩体超低摩擦效应。潘一山^[13] 等基于摆型波理论研究超低摩擦现象发生机理。王来贵^[14] 等通过理

^{*} 收稿日期: 2018-05-03; 修回日期: 2018-07-17

基金项目: 辽宁省自然科学基金项目(201602353); 国家自然科学基金项目(51474120)

通讯作者: 李利萍(1983-), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事深部岩体力学特性方面的教学与研究工作。Email: llpah@126.com

论与数值分析相结合的方法,揭示了地震载荷作用下单—结构面边坡系统的超低摩擦效应机制。国内外学者在超低摩擦效应方面取得了一定的研究成果,但现有试验均未考虑块体受围压作用,而在实际采矿工程中,深部岩体结构更趋于破碎、分层性,力学性质由脆性向塑性和延性转化。深部岩体在未受到开挖扰动前,均处于三向受压状态。人工采掘临近工作面破碎岩体受弱围压作用,若遇冲击载荷强扰动,岩体临界平衡条件发生变化导致岩体运动,块体间相对加速度发生剧烈变化,当块体间垂直加速度差值达到峰值时,块系岩体超低摩擦效应强度最大,岩体临界平衡条件发生变化导致岩体运动,发生摩擦滑动失稳,对矿山安全持续开采及人身安全构成严重威胁^[15-17]。基于上述情况,开展块系岩体在弱围压和冲击载荷强扰动下的超低摩擦效应试验研究具有重要意义。因此本文以垂直加速度差值作为重要参数,研究弱围压和冲击载荷对块系岩体超低摩擦效应强度、超低摩擦效应作用时间以及发生超低摩擦效应最大强度的时间等参数的影响,研究结果对超低摩擦效应机理的深入认识具有参考价值。

1 试验设计

针对深部开采实际,岩体结构趋于破碎,临近工作面待开采岩体受弱围压作用,遇冲击载荷强扰动时,易诱发超低摩擦型冲击地压,自主研发了弱围压块系岩体超低摩擦模拟试验装置,考虑垂直加速度差值变化实际上反映了块系岩体间摩擦力作用,因此本文以垂直加速度差值变化作为超低摩擦效应特征参数,分析块系岩体超低摩擦效应发生规律。通过分析冲击载荷强度、围压对垂直加速度差值变化的影响,以深入认识超低摩擦效应产生机理和规律。

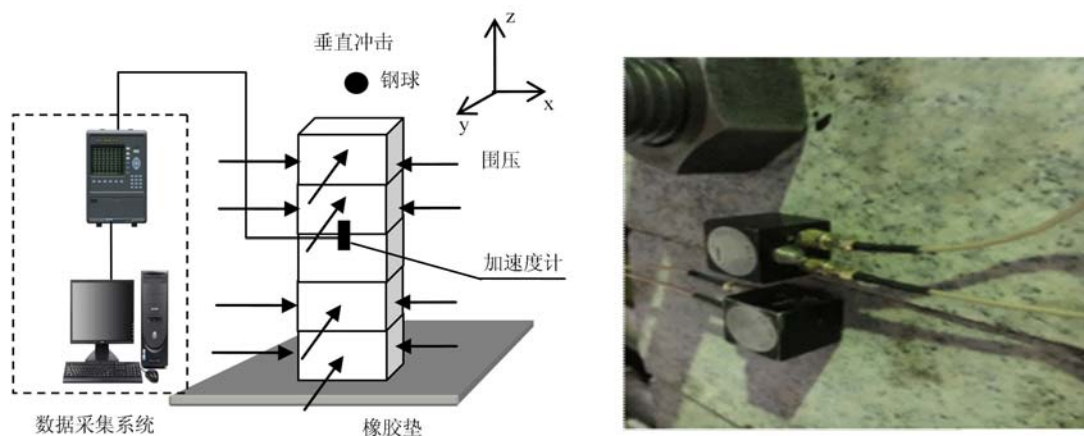


图1 试验模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental model

图1所示为试验模型示意图。选取长宽高为 $200\text{mm} \times 100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 的标准花岗岩块体作为试验对象,使用焊接钢架承载围压加载螺栓,除第三块工作块体外,在岩块四周固定钢板,通过旋进围压加载螺栓实现钢板对岩块水平方向上施加载荷,以达到对岩块施加围压的目的。X方向所受围压分别为 0MPa 、 0.150MPa 、 0.238MPa 、 0.305MPa 、 0.373MPa 、 0.474MPa 。通过从不同高度下落的钢球来模拟垂直冲击,下落高度分别为 30cm 、 60cm 、 90cm ,即块体所受垂直冲击大小分别为 1.528J 、 3.058J 、 4.586J 。试验使用的测量装置为TST-5915数据采集仪,最高采样频率为 100kHz ,三向加速度传感器的灵敏系数分别为: $X:0.996\text{mV}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$, $Y:1.012\text{mV}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$, $Z:0.989\text{mV}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$;频率范围为 $0.5 \sim 3000\text{Hz}$;最大允许加速度为 $5000\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

试验步骤:

(1) 将5块上下叠放的花岗岩试件放置在橡胶衬垫上,将加速度传感器粘贴在第三块花岗岩块体顶部及第四块花岗岩块体底部中央位置;

(2) 除第三块岩体外,通过旋进螺栓对岩体施加围压。标记螺母旋转角度可获得螺栓旋进距离,使用压力传感器计算出对岩体所施加的围压大小,如图2所示。

- (3) 将重 0.52kg 的钢球从 30cm 高度自然下落,相当于对块体施加 1.528J 垂直冲击;
 (4) 改变围压和小球下落高度,重新试验,共做 18 组。

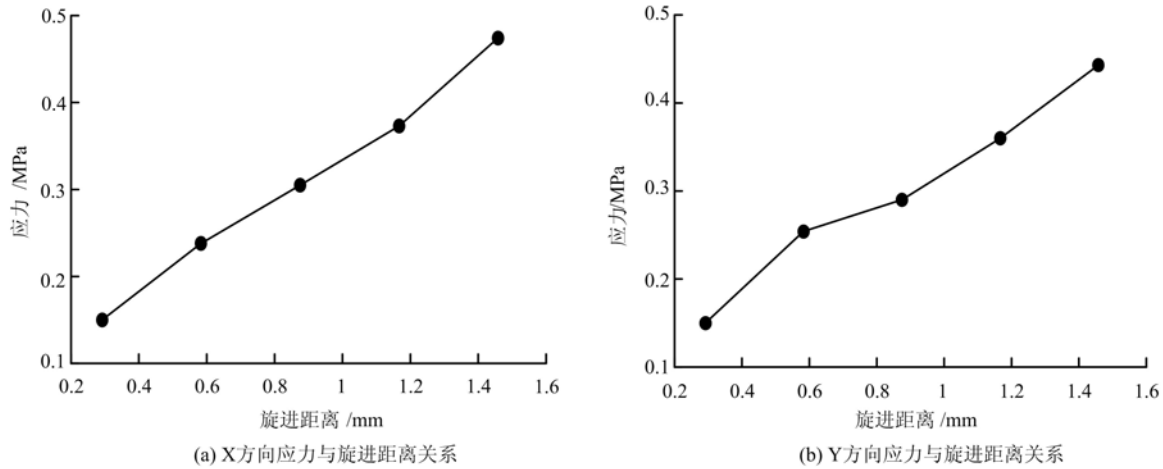


图 2 加载螺栓旋进距离与围压关系

Fig. 2 Relationship between loading distance and confining pressure of loading bolt

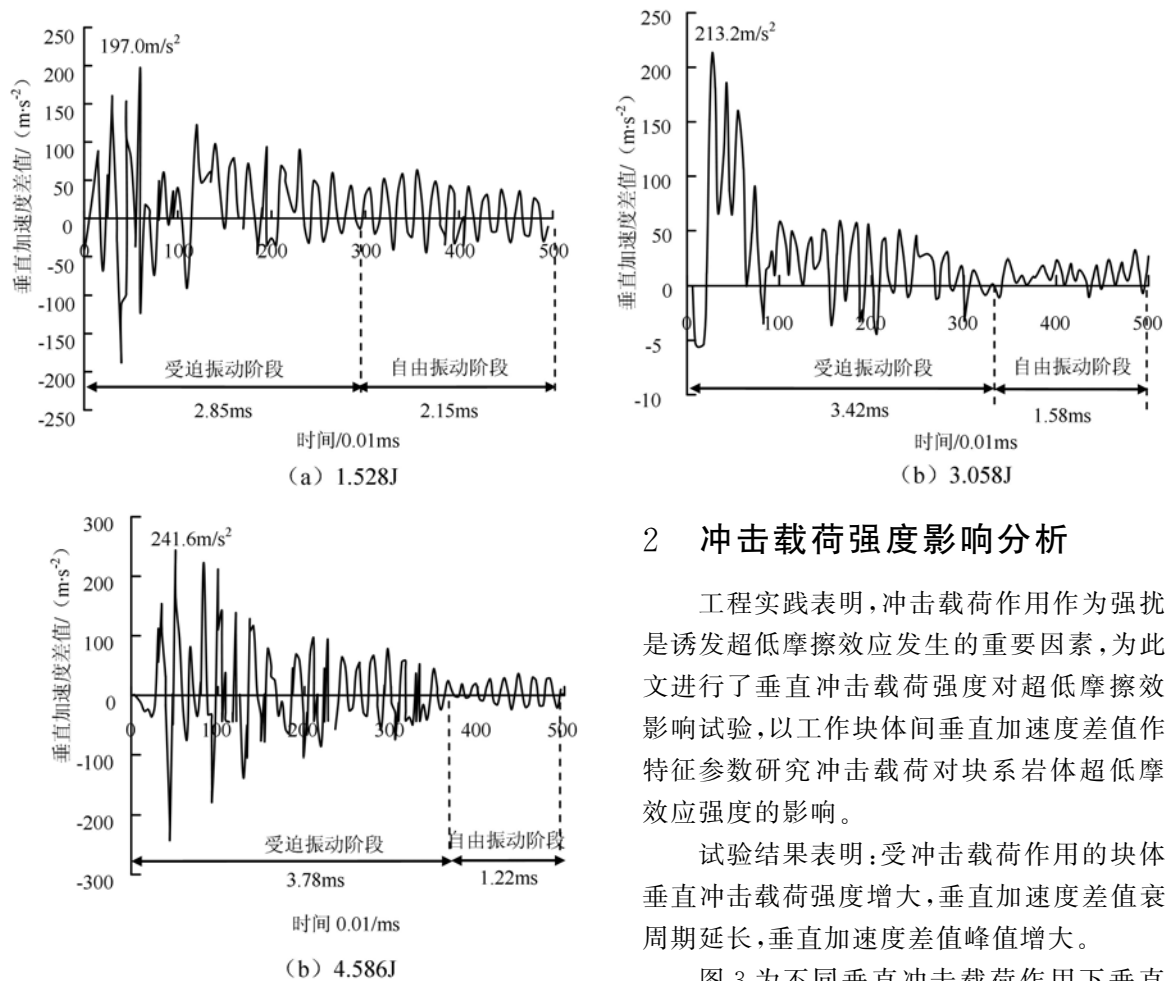


图 3 不同冲击载荷时工作块体垂直加速度差值曲线

Fig. 3 Vertical acceleration difference curves of working blocks under different impact loads

2 冲击载荷强度影响分析

工程实践表明,冲击载荷作用作为强扰动是诱发超低摩擦效应发生的重要因素,为此本文进行了垂直冲击载荷强度对超低摩擦效应影响试验,以工作块体间垂直加速度差值作为特征参数研究冲击载荷对块系岩体超低摩擦效应强度的影响。

试验结果表明:受冲击载荷作用的块体随垂直冲击载荷强度增大,垂直加速度差值衰减周期延长,垂直加速度差值峰值增大。

图 3 为不同垂直冲击载荷作用下垂直加速度差值变化曲线,由图可以看出:岩块垂直加速度差值曲线首先在动载作用下产生了多次剧烈波动,随后骤变衰减为正弦波,且有明显分界点,说明垂直冲击载荷作用下花岗岩块

体存在两种振动阶段,分别为受迫振动阶段和自由振动阶段,自由振动使得岩块内部由于仅剩冲击波作用呈现出较为规律的正弦波动曲线。这一现象与王洪亮等人研究的结论“作用在块体上的法向力分别经历了受迫振动阶段和自由振动阶段,变化形式类似于类正弦曲线,但幅值逐渐减弱”^[18]相符合。当冲击载荷由 1.528J 依次增加 3.058J、4.586J 时,垂直加速度差值峰值依次为 197.0m/s^2 、 213.2m/s^2 、 241.6m/s^2 ,垂直加速度差值衰减时间由 2.85ms 增加到 3.42ms、3.78ms。说明岩体所受垂直冲击载荷强度越大时,超低摩擦效应强度越大,超低摩擦效应持续时间越长。

3 围压影响分析

围压反映了不同深度岩体受水平地应力作用的情况,深部岩体由于受人工采掘活动,临近工作面破碎岩体受弱围压作用,若遇冲击载荷强扰动,易发生超低摩擦效应,最终诱发如冲击地压岩爆、煤与瓦斯突出、工程性地震等一系列动力工程灾害,因此研究围压作用的影响对于揭示超低摩擦效应机理具有重要意义。

本文进行了定值垂直冲击载荷下,岩块工作块体在不同围压的垂直加速度差值变化特征试验研究,所得研究表明:受垂直冲击载荷作用的块体,其所受围压越大,垂直加速度差值衰减时间越长,且存在围压临界值使得垂直加速度差值达到峰值。

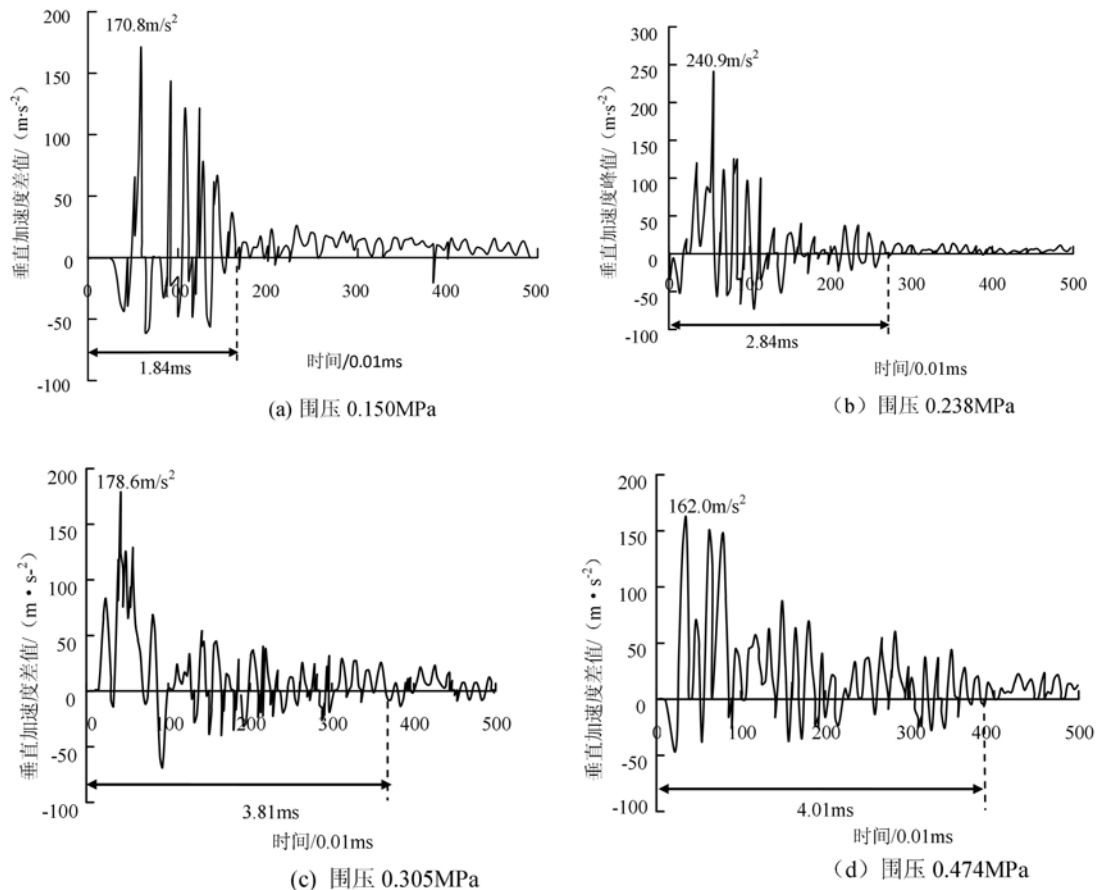


图4 不同围压作用下垂直加速度差值变化曲线

Fig. 4 Variation curves of vertical acceleration and acceleration difference under different confining pressures

由图4分析可知:工作块体在 1.528J 垂直冲击载荷与围压共同作用下,振动形式仍分为受迫振动阶段和自由振动阶段,且随着块体所受围压增大,受迫振动阶段和自由振动阶段分界点不再明显,垂直加速度差值衰减速度变慢,当围压由 0.15MPa 依次增加到 0.238MPa、0.373MPa、0.474MPa 时,垂直加速度差值衰减时间分别为 1.84ms、2.84ms、3.81ms、4.01ms,说明围压抑制了花岗岩试件内部振动

波的自由传播,使得工作块体从受迫振动到自由振动阶段逐渐衰减变化。而围压增大后,受迫振动时间延长,受迫振动与自由振动的分界点逐渐变得不明显,甚至消失。围压作用使冲击能转化为块体动能的速度被迟滞,增大了冲击载荷影响在花岗岩块体内的滞留时间,延长了花岗岩试件受迫振动阶段的时间,使得超低摩擦效应作用时间延长。

当围压由 0.15MPa 依次增加到 0.238MPa、0.305MPa、0.474MPa 时,垂直加速度差值峰值分别为 170.8m/s^2 、 240.9m/s^2 、 178.6m/s^2 、 160.2m/s^2 。当围压为 0.238MPa 时,垂直加速度差值峰值最大,存在围压临界点使得超低摩擦效应强度最大,并且围压增大也使得垂直加速度差值峰值发生时间出现突变。由此可见,虽然增加围压会使受迫振动的时间延长,但垂直加速度差值峰值及其发生时间与围压并不呈线性关系。因此下面将研究围压对垂直加速度差值峰值及其发生时间的影响规律。

3.1 围压对垂直加速度差值峰值的影响

煤矿回采工作面受弱围压作用下,遇冲击载荷强扰动时,岩体临界平衡条件发生变化导致岩体运动,块体间相对加速度发生剧烈变化,当块体间垂直加速度达到峰值时,块体超低摩擦效应强度最大。下面将通过分析岩层间接触面上下两块体垂直加速度差值峰值变化规律研究块体间超低摩擦效应作用强度。

岩块工作块体垂直加速度差值随垂直冲击载荷及围压的变化而不同,本文通过进行工作块体在不同垂直冲击载荷及围压作用下加速度差值变化特征试验研究,所得结果表明:

(1) 相同大小冲击载荷作用下的块体,随着围压增大,垂直加速度差值峰值呈先减小后增大又减小的波动变化趋势,存在临界围压使得垂直加速度差值峰值达到最大值。

图 5 为受冲击载荷和围压共同作用的块体垂直加速度差值峰值变化曲线图。当围压由 0MPa 增加到 0.15MPa 时,垂直加速度差值峰值小幅减小;围压由 0.15MPa 增加到 0.238MPa 时,块体垂直加速度差值峰值增加幅度最大;冲击载荷为 1.528J、3.058J、4.586J 时,垂直加速度差值峰值依次增加为 70.2m/s^2 、 254m/s^2 、 390m/s^2 ;当围压为 0.238MPa 时,垂直加速度差值最大值达到最大,依次为 241m/s^2 、 439m/s^2 、 592m/s^2 ;当围压继续增大,垂直加速度差值峰值减小,然后逐渐衰减,这说明受弱围压与冲击载荷共同作用的块体,存在围压临界值,使得超低摩擦效应强度达到最大。

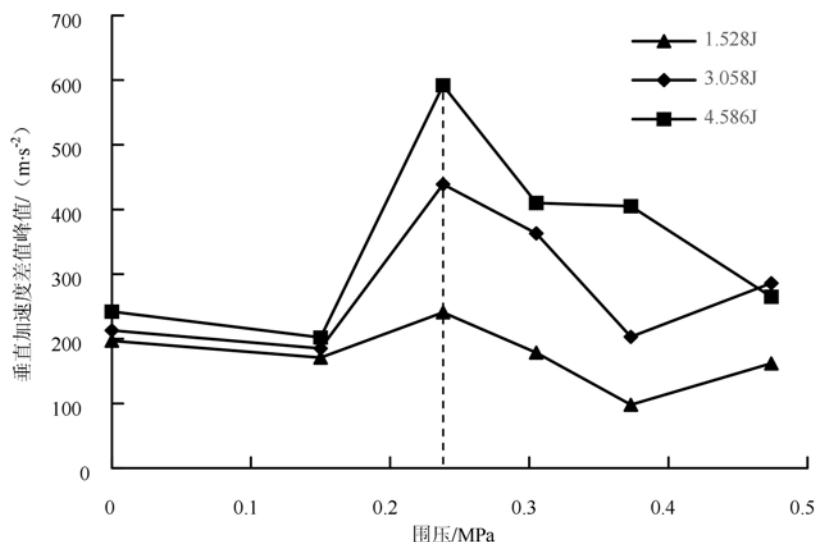


图 5 垂直加速度差值峰值与围压关系曲线

Fig. 5 Relation curve of vertical acceleration difference peak value and confining pressure

(2) 相同围压作用下,受冲击载荷作用块体随着冲击载荷增大,垂直加速度差值峰值增大。

受冲击作用的块体在受相同围压作用时,冲击载荷越大,垂直加速度差值峰值越大。当块体不受围压作用时,冲击载荷由 1.528J 依次增加到 3.058J、4.586J,垂直加速度分别为 197m/s^2 、 213m/s^2 、

242m/s²。

由以上试验结果可得,垂直加速度差值峰值并不与围压大小呈线性关系,本试验中围压由 0MPa 增加到 0.238MPa 时,垂直加速度差值峰值先减小后增大。这说明当块体所受围压极小时,超低摩擦效应强度不大,而当围压增大到一定值时超低摩擦效应强度会显著增强。在实际工程中岩爆在浅部低围压处发生次数同样很少,岩爆在深部岩体频繁发生^[19]。当围压为 0.238MPa 时为本试验的临界点,使得超低摩擦效应强度达到最大。这与李利萍等^[20]的研究“开采深度不同时,接触界面法向载荷随时间变化不同,超低摩擦型冲击地压的发生存在临界区域”相符合。

3.2 围压对垂直加速度差值峰值发生时间的影响

岩层间接触面上下表面垂直加速度差值峰值发生时间反映了从冲击载荷作用到超低摩擦效应发生最剧烈的这段时间,时间越短则说明超低摩擦效应发生越快,越容易引发工程灾害,因此研究围压对超低摩擦效应最大强度发生时间的影响具有重要意义。

本文通过试验研究了岩块在不同垂直冲击载荷及围压共同作用下,工作块体垂直加速度差值的变化规律,结果表明:

(1) 受冲击载荷及围压共同作用的块体,冲击载荷及围压对垂直加速度差值峰值发生时间影响大致呈先降低后再升高再减低趋势,将其分为两个阶段,第Ⅰ阶段为冲击载荷主导作用阶段,第Ⅱ阶段为围压主导作用阶段。

(2) 受冲击载荷及围压共同作用的块体,冲击载荷越大,垂直加速度差值峰值发生越快,并且增加围压会使得垂直加速度峰值发生时间提前,但当试验围压最大时,不同冲击载荷作用下块体垂直加速度峰值发生时间将趋于一致。

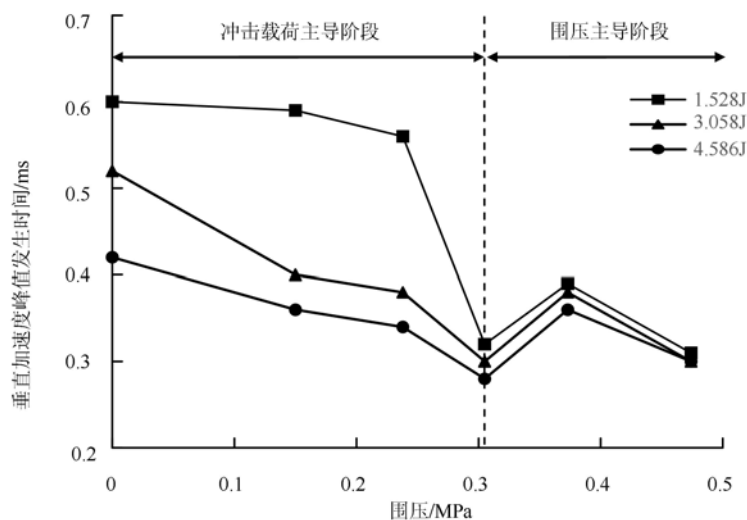


图6 垂直加速度差值峰值发生时间与围压关系曲线

Fig. 6 The graph of the relationship between the time of vertical acceleration difference maximum value's occur and the confining pressure

图6为受冲击载荷及围压共同作用块体冲击载荷及围压对垂直加速度差值峰值发生时间的变化曲线,冲击载荷及围压对其影响分Ⅰ、Ⅱ两个阶段。在第Ⅰ阶段中,当岩块不受围压作用时,垂直加速度差值峰值出现的时间会随着冲击载荷强度增大而减小,当围压由 0MPa 增加到 0.305MPa 时,垂直加速度差值峰值出现时间减小,而冲击载荷由 1.528J 增加到 3.058J、4.586J 时,垂直加速度差值峰值发生时间依次减小 0.28ms、0.22ms、0.14ms,以上研究结果说明受较小冲击载荷作用的块体,若对其增加围压作用,会使得岩块间的超低摩擦效应危险性大大增强。本文中当围压小于 0.305MPa 时,冲击载荷对垂

直加速度发生时间影响更大。在第Ⅱ阶段,当围压大于 0.305MPa 时,垂直加速度差值峰值发生时间先小幅增大再减小,当围压为 0.47MPa 时,垂直加速度差值峰值发生时间趋于一致,均为 0.3ms。在第Ⅱ阶段,增大围压使得垂直差值加速度峰值发生时间不规律性增强,此时围压对垂直加速度差值峰值发生时间影响更大,当围压增加到 0.3MPa 之后,垂直加速度差值峰值出现时间曲线将趋于平稳,此时冲击载荷的大小对其影响不大,当围压增加到 0.5MPa 左右时,垂直加速度差值峰值发生时间将趋于一致。

通过以上试验现象所得结论可以看出:受垂直冲击载荷与弱围压共同作用块体,冲击载荷与围压对块体超低摩擦效应最大强度发生时间存在不同主导阶段,围压增大使得超低摩擦效应最大强度发生时间提前,当块体所受围压足够大时,块体超低摩擦效应最大强度发生时间趋于一致。

4 结 论

试验对花岗岩块体施加垂直冲击载荷及弱围压共同作用,通过垂直加速度差值变化研究块体超低摩擦效应强度,分析得到了弱围压及垂直冲击载荷对超低摩擦效应的影响规律,研究表明:

(1) 垂直冲击载荷作用下块体存在两种振动阶段,分别为受迫振动阶段与自由振动阶段。随着冲击载荷增大,垂直加速度差值衰减时间延长,垂直加速度差值峰值增大,超低摩擦效应强度增大;

(2) 弱围压和垂直冲击载荷共同作用下,块体由受迫振动阶段到自由振动阶段过程中,随围压增大,块体受迫振动时间延长,两阶段间分界明显程度减弱,垂直加速度差值峰值呈先减小后增大又减小的波动变化趋势,存在围压临界值,使超低摩擦效应强度达到最大;

(3) 受弱围压和垂直冲击共同作用的块体,垂直加速度差值峰值发生时间分为两个阶段,冲击载荷主导阶段和围压主导阶段。与无围压相比,施加围压后超低摩擦效应最大强度发生时刻提前,且当试验围压最大时,超低摩擦效应最大强度发生时刻趋于一致。

需指出的是,本文所得结论对研究超低摩擦效应型冲击地压具有一定参考意义,但由于深部岩体所处环境的复杂性,本文未考虑岩块所受的高地应力情况,以及只考虑了垂直冲击情况,并未考虑岩块所受水平冲击作用,因此深部岩体的超低摩擦效应仍需进一步研究。

参考文献:

- [1] 廖春良. “十二五”时期中国能源结构的演变[J]. 上海经济, 2010(12):40—43 (LIAO Chunliang. The evolution of China's energy structure during the “Twelve-Year Plan”[J]. Shanghai Economy, 2010(12):40—43 (in Chinese))
- [2] 范德成, 王韶华, 张伟. 低碳经济目标下一次能源消费结构影响因素分析[J]. 资源科学, 2012, 34(4):696—703 (FAN Decheng, WANG Shaohua, ZHANG Wei. Analysis of the influence factors of the primary energy consumption structure under the target of low-carbon economy[J]. Resources Science, 2012, 34(4):696—703 (in Chinese))
- [3] 谢和平, 高峰, 鞠扬, 等. 深部岩体力学研究探索[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11):2161—2178 (XIE Heping, GAO Feng, JU Yang, et al. Research and development of rock mechanics in deep[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11):2161—2178 (in Chinese))
- [4] 王志国, 周宏伟, 谢和平, 等. 深部开采对覆岩破坏移动规律的实验研究[J]. 实验力学, 2008, 23(6):503—510 (WANG Zhiguo, ZHOU Hongwei, XIE Heping, et al. Experimental study of the rule of overlying strata movement and breakage in deep mining[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2008, 23(6):503—510 (in Chinese))
- [5] Oparin V N, Yushkin V F, Akinin A A, et al. On a new scale of structural-hierarchical conceptions as a certificate characteristic of geomedium[J]. Fiz.-Tekh. Probl. Objects. Razrab. Polezn. Iskop, 1998(5):578—580.
- [6] Kurlenya M V, Oparin V N, Yeryomenko A A. On the ratio of the linear dimensions of rock blocks to the magnitudes of crack opening in the structural hierarchy of a mass[J]. Fiz.-Tekh. Probl. Objects. Razrab. Polezn.

- Iskop, 1993(2):6—33.
- [7] Revuzhenko P. The mechanics of elastoplastic media and nonstandard analysis[M]. Novosibirsk: Izd NGU, 2000.
- [8] Kyrlenya M V, Oparin V N. Problems of nonli-near geomechanics: part I[J]. Fiz. -Tekh. Probl. Razrab. Polezn. Iskop, 1999(3):435—442.
- [9] Курленя М В, Опарин В Н, Еременко А А. Об ношении линейных размеров блоков пород к раскрытию трещин в структурной иерархии массивов[J]. ФТПРПИ, 1998(2):6—33.
- [10] 钱七虎. 深部地下空间开发中的关键科学问题[C]. 第230次香山科学会议——深部地下空间开发中的基础研究关键技术问题, 2004 (QIAN Qihu. Key scientific problems in the development of deep underground space[C]. The 230th Science Conference on Xiangshan Mountain — Key technical problems in the development of deep underground space, 2004 (in Chinese))
- [11] 王洪亮, 葛涛, 王德荣, 等. 块系岩体动力特性理论与实验对比分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 951—958 (WANG Hongliang, GE Tao, WANG Derong, et al. Comparison of theoretical and experimental analyses of dynamiac characteristics of block rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5):951—958 (in Chinese))
- [12] 李丽萍, 潘一山, 章梦涛. 基于简支梁模型的岩体超低摩擦效应理论分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增1): 2715—2720 (LI Liping, PAN Yishan, ZHANG Mengtao, et al. Theoretical analysis of effect of anomalously low friction on rock mass based on simply supported beam model [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(s1):2715—2720 (in Chinese))
- [13] 潘一山, 王凯兴. 岩体间超低摩擦发生机理的摆型波理论[J]. 地震地质, 2014, 36(5):833—844 (PAN Yishan, WANG Kaixing. Pendulum-type waves theory on the mechanism of anomalously low friction between rock masses [J]. Seismology and Geology, 2014, 36(5):833—844 (in Chinese))
- [14] 王来贵, 习彦会, 周向, 等. 地震边坡超低摩擦效应启滑机理分析[J]. 防震减灾工程学报, 2016, 36(4):595—600 (WANG Laigui, XI Yanhui, ZHOU Xiang, et al. Analysis of open-slip with anomalously low friction effect of slope under earthquake[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(4):595—600 (in Chinese))
- [15] Oparin V N, Yushkin V F, Akinin A A, et al. On a new scale of structural-hierarchical conceptions as a certificate characteristic of geomedium[J]. Fiz. -Tekh. Probl. Objects. Razrab. Polezn. Iskop, 1998(5):578—580.
- [16] Revuzhenko P. The mechanics of elastoplastic media and nonstandard analysis[M]. Novosibirsk: Izd NGU, 2000.
- [17] 吕祥锋, 王振伟, 潘一山. 煤岩巷道冲击破坏过程相似模拟试验研究[J]. 实验力学, 2012, 27(3):311—318 (LV Xiangfeng, WANG Zhenwei, PAN Yishan. Similar simulation experimental study of impact failure process of coal roadway[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2012, 27(3):311—318 (in Chinese))
- [18] 吴昊, 方秦, 王洪亮. 深部块系岩体超低摩擦现象的机理分析[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(5):769—775 (WU Hao, FANG Qin, WANG Hongliang. Mechanism of anomalously low fricyion phenomenon in deep block rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 30(5):769—775 (in Chinese))
- [19] 李长洪, 蔡美峰, 乔兰, 等. 岩全石应力应变曲线及其岩石爆关系[J]. 北京科技大学学报, 1999, 21(6):513—515 (LI Changhong, CAI Meifeng, QIAO Lan, et al. Rock completestress-strain curve and its relationship to rock burst[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 1999, 21(6):513—515 (in Chinese))
- [20] 李丽萍, 潘一山, 王晓纯. 开采深度和垂直冲击荷载对超低摩擦型冲击地压的影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(1):3225—3230 (LI Liping, PAN Yishan, WANG Xiaochun. Influence analysis of exploit depth and vertical impact load on anomalously low friction rockburst [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(1):3225—3230 (in Chinese))

Experimental study of anomalously low friction effect of block rock mass subjected to weak confining pressure and strong vertical impact disturbance

LI Li-ping¹, JU Xiang-yu¹, PAN Yi-shan², WANG Lin³, TAI Ying-lou¹

(1. School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. School of Physics, Liaoning University, Shenyang 123000, China; 3. School of Transportation and Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116000, China)

Abstract: With the increase of mining depth, the structure of deep rock mass tends to be broken. When the rock mass under mining near the working face is subjected to weak confining pressure, and when the impact load is strongly disturbance, it is easy to induce anomalously low friction type rock burst. In this paper, self-developed anomalously low friction simulation experimental device of weak confining block rock mass is used to simulate the broken rock mass near deep working face by using five superimposed granite blocks. The weak confining pressure is applied on the block rock mass by bolting loading method, and vertical impact load is applied to simulate strong disturbance. Taking the variation of vertical acceleration difference as the characteristic parameter of anomalously low friction effect strength, the influence of impact load strength and confining pressure on the anomalously low friction effect of block rock mass was analyzed. Results show that the vibration of block rock mass can be divided into two phases; forced vibration and free vibration under the vertical impact load. With the increase of impact load, the vertical acceleration difference of block increases, and the vertical acceleration difference attenuation time extension. This moment, the intensity and duration of anomalously low friction effect increase significantly. Under the combined action of confining pressure and impact load, the critical value of confining pressure makes the maximum intensity of anomalously low friction effect. With the increase of confining pressure, the maximum strength of anomalously low friction effect occurs earlier. When the experimental confining pressure reaches the maximum, the maximum strength of anomalously low friction effect tends to be consistent.

Keywords: anomalously low friction effect; weak confining pressure; vertical impact load; rock burst; block rock mass