

杨胜利,李兆欣,魏炜杰,等. 综放开采散体顶煤对支架与围岩关系影响的实验研究[J]. 煤炭学报,2017,42(10):2511-2517. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.1008

YANG Shengli,LI Zhaoxin,WEI Weijie, et al. Influence of loose top-coal on support and surrounding rock relationship in longwall top-coal caving mining[J]. Journal of China Coal Society,2017,42(10):2511-2517. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.1008

综放开采散体顶煤对支架与围岩关系影响的实验研究

杨胜利^{1,2},李兆欣^{1,2},魏炜杰^{1,2},张锦旺^{1,2}

(1. 中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院,北京 100083; 2. 放顶煤开采煤炭行业工程研究中心,北京 100083)

摘要:散体顶煤的存在会改变综放开采支架与围岩相互作用关系。自主设计了散体动载荷冲击实验平台,对不同散体颗粒种类、不同颗粒大小、不同堆积厚度以及不同冲击力条件下进行动载冲击实验,揭示了散体顶煤对综放开采支架与围岩作用关系的影响。研究发现:散体密度与缓冲效果存在正相关,散体顶煤的堆积密度越大,散体缓冲上部动载荷效果越明显;散体堆积厚度变化存在临界值,当堆积厚度小于临界值时,破碎岩石堆积厚度越小冲击效果越明显,相反冲击压力随着堆积厚度的增加逐渐减小而后趋于不变;散体粒径越大,岩石缓冲上部动载荷效果越明显,但缓冲曲线的波动性较大,表明冲击过程比较剧烈。同时,提出了在支架选型时,要综合考虑煤层赋存条件、破碎顶煤性质及支架结构性能等因素,以保证放顶煤安全开采。

关键词:破碎顶煤;岩石颗粒;动载荷;支架与围岩关系;缓冲性能

中图分类号:TD323 文献标志码:A 文章编号:0253-9993(2017)10-2511-07

Influence of loose top-coal on support and surrounding rock relationship in longwall top-coal caving mining

YANG Shengli^{1,2}, LI Zhaoxin^{1,2}, WEI Weijie^{1,2}, ZHANG Jinwang^{1,2}

(1. School of Resource and Safety Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China; 2. Coal Industry Engineering Research Center of Top-coal Caving Mining, Beijing 100083, China)

Abstract: The support and surrounding rock relationship is affected by the loose top-coal in longwall top-coal caving mining (LTCC). The dynamic load tests under different particle types, particle sizes, particle packing thicknesses and impact forces were carried out by using the self-developed dynamic load impact test device, and revealed the influence of loose top-coal in LTCC on supports and surrounding rock relationship. It was found that the buffer effect is positively correlated with the particle packing density, that is to say, the buffer effect is more obvious with the larger particle packing density; when the packing thickness is less than a critical value, the impact effect is more obvious with the smaller packing thickness, on the contrary, the impact force gradually decreases then to be stable with the increment of packing thickness; though the effect of buffering dynamic load becomes greater with the increase of particle sizes, the buffer curve fluctuates obviously, which indicates that the impact process is severe. At the same time, the factors such as the condition of coal seam, the properties of loose top-coal and the structure performance of support should be considered in selecting support type, so as to ensure the safe mining.

Key words: broken top-coal; rock particles; dynamic load; the support and the surrounding rock relationship; buffer effect

收稿日期:2017-07-23 修回日期:2017-08-25 责任编辑:常琛

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51574244, 51674264, U1361209)

作者简介:杨胜利(1983—),男,内蒙古宁城人,副教授。E-mail:yslscumb@163.com。通讯作者:张锦旺(1989—),男,山西中阳人,博士。E-mail:jinwangzhang@hotmail.com

在综放工作面,基本顶破断或失稳以后形成的载荷通过直接顶和破碎顶煤作用在液压支架上,相反液压支架通过控制顶煤和直接顶进而控制基本顶变形或下沉,从而形成稳定的回采空间,保障工作面的正常推进^[1-3]。由于综放支架上方是顶煤,破碎的顶煤改变了工作面支架与围岩相互作用关系,这与普通综采工作面明显不同^[4-5]。顶煤的破碎与冒落受煤体强度、裂隙发育程度、夹矸厚度与层位、煤层赋存和开采条件等因素影响,尤其是煤体的强度和裂隙发育程度对顶煤的破碎影响显著^[6-8]。当煤层较软、裂隙发育时,在液压支架上方顶煤往往进入散体状态,散体顶煤对上覆岩层形成的动载荷载会形成明显的衰减作用;而煤层较硬、裂隙不发育时,支架上方的顶煤则形成多裂隙分布的损伤体,此时对顶板破断形成的动载荷载衰减程度有限,在计算顶板载荷时按着静载荷处理,因此,不同条件的顶煤在支架与围岩关系中的影响是不同的。关于综放开采支架与围岩关系的研究很多学者很早就进行了关注。

吴健^[9]通过实践调查发现,放顶煤工作面的周期来压减少且来压强度有所减小,并且综放工作面液压支架的实际支撑力不变;杨科^[10]提出综放支架工作阻力主要与顶煤的结构和力学性质有关,而采场顶板的下沉量由“基本顶-直接顶-支架”之间的相互作用决定;于斌^[11]提出了在放顶煤工作面上部围岩控制中,因为上部顶煤的存在,使基本顶断裂对支架的影响弱化,成为次要的控制对象;前苏联学者^[12]得出顶煤发生破碎的主要原因是顶煤受到支承压力的结果。

在散体颗粒对冲击载荷作用方面,徐连满^[13]通过采用落球冲击煤岩块实验装置,得出散体煤岩相对于整体岩块来说具有良好的缓冲效果,分析了煤岩块体粒径对于冲击压力吸收效果的影响;季顺迎^[14]得出颗粒物质是一种庞大的能量消耗体系,颗粒之间的作用力和黏滞力可使冲击力引起的能量有效衰减,达到良好的缓冲效果;王光谦^[15]通过研究 cunkall 和 strack 的软球模型,在软球模型中,将颗粒接触点处的作用力简化为一个弹簧模型(K),通常采用线性胡克弹簧,同时发现软球模型适用于高浓度颗粒流的计算;孔亮^[16]通过研究岩土材料吸收所受到塑性功发现,并非所有的塑性功都消耗,而是其中一部分保存下来;赵阳等^[17]研究发现颗粒之间的接触力会随着颗粒粒径的变大而增大,并且颗粒本身缺陷也会影响接触力的大小。上述研究成果为研究散体顶煤对支架与围岩作用关系提供了思路。

综合以上研究发现,目前已经认识到顶煤的存在

会影响支架与围岩关系,却很少将散体顶煤对顶板载荷的减缓作用给出定量的描述,因此,通过研发散体顶煤冲击实验系统,模拟不同支架类型、不同顶煤破碎块度、不同顶煤厚度条件下散体顶煤对顶板破断以后载荷的衰减作用,揭示散体顶煤作用下支架与围岩相互作用关系。

1 动载冲击实验平台研制与实验

在放顶煤工作面,破碎顶煤的存在会减缓顶板破断或者失稳以后形成的动载冲击,减缓的程度与顶煤的裂隙发育程度、破碎块度大小,以及放出规律相关。因此,研制了动载冲击实验平台,研究了破碎顶煤对上部动载荷载缓冲影响。

1.1 动载荷载实验平台研制

为了揭示破碎顶煤对顶板载荷的缓冲作用,研制了动载荷载冲击实验系统,如图1所示。该实验系统包括:冲击重锤、透明承载箱、液压缸、压力传感器、数据采集系统等。冲击重锤用于模拟顶板破断以后形成的冲击荷载,其直径为30 cm,高度10 cm,质量为25 kg;透明承载箱的长×宽×高=40 cm×40 cm×60 cm,四周是由透明的防弹玻璃组成,并且标有刻度,承载箱底部为厚度3 cm的不锈钢板;为了更接近与现场实际情况,实验系统采用4个外注液式液压缸模拟液压支架,并通过放置在液压缸和承载箱底部钢板之间的压力传感器实时采集冲击荷载和静荷载;数据采集系统与压力传感器配套,数据采集频率为25 Hz,每0.04 s采集一次,可以有效采集顶板冲击荷载,如图2所示。

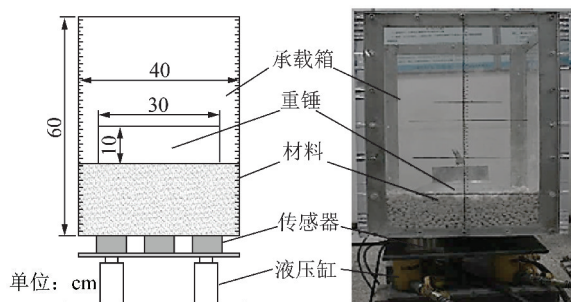


图1 动载荷载冲击实验台

Fig. 1 Dynamic load impact test device

1.2 实验材料选取

为了模拟不同块度的顶煤,选取不同粒径且密度相近的散体碎石材料进行模拟,共选取了3种岩石材料,如图3所示。其中,两种粒径大小不同材料相同的白色鹅卵石,颗粒粒径分别为1~2 cm和3~4 cm,鹅卵石表面光滑,大小均匀。另一种粒径大小为1~2 cm的石灰石,表面有棱角,堆积密度相对鹅卵石较

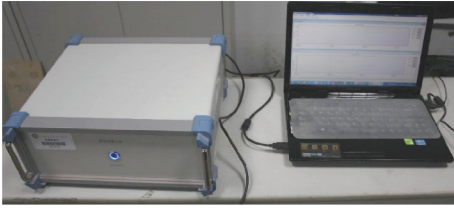


图 2 数据采集与处理系统

Fig. 2 Data acquisition and analysis system

小,散体材料性质见表 1。将两种颗粒粒径相同的不同岩石按照 1 : 1 的比例混合,形成另一种新的散体材料类型。

表 1 不同散体颗粒参数

Table 1 Parameters of different particle types

散体材料	粒径/cm	岩石性质
鹅卵石	1~2	表面光滑,无棱角
鹅卵石	3~4	表面光滑,无棱角
石灰石	1~2	表面粗糙,有棱角

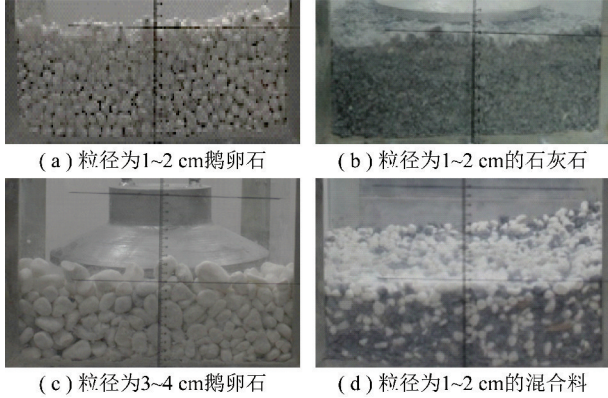


图 3 散体实验材料

Fig. 3 Granular experimental material

2 散体顶煤动载冲击实验

2.1 不同种类散体动载冲击实验

在实际生产中,煤层赋存条件差别很大,力学性质也不尽相同,因此,破碎以后煤块表面差别比较大,比如硬煤破碎后会呈现表面尖角多、堆积密度小,而软煤破碎后尖角小,堆积密度大的特点。为了揭示煤块表面尖角对冲击载荷的影响,选用相同粒径(1~2 cm)表面光滑的鹅卵石和表面粗糙的石灰石进行对比实验。经测量,两种岩石分别在承载箱中堆积相同高度 $h = 10\text{ cm}$,则鹅卵石的质量为 $m = 31\text{ kg}$,其堆积密度 ρ_{b1} 为 $1\ 937.5\text{ kg/m}^3$,石灰石质量为 $m = 20\text{ kg}$,其堆积密度 ρ_{b2} 为 $1\ 250\text{ kg/m}^3$;将两种岩石按照 1 : 1 比例进行混合,组合成一种新的混合岩石材料,同样在承载箱中堆积高度 $h = 10\text{ cm}$,其质量 $m =$

24 kg ,堆积密度为 $\rho_{b3} = 1\ 500\text{ kg/m}^3$ 。

在实验过程中,对于 3 种不同材料分别进行多次垂直冲击实验,将重锤进行垂直冲击,冲击高度分别选取为 10 cm 和 20 cm。冲击过程中将液压缸初撑力设置为 5 kN,并用压力传感器实时采集冲击载荷大小,为了保证数据的精确度,每种岩石材料相同高度冲击 20 次以上,采集的有效数据取平均值处理。将实验共分为 6 组,即 $A_1, A_2, B_1, B_2, C_1, C_2$ 。采集冲击压力峰值数据见表 2,冲击过程中采集的数据如图 4 所示,在表 2 中冲击压力 F_1 为

$$F_1 = F - F_2 - mg \quad (1)$$

式中, F 为实验过程中采集有效压力值, N; F_2 为承载箱的重量, N; m 为缓冲岩石的质量, kg; g 为重力加速度, m/s^2 。

表 2 不同岩石颗粒实验参数

Table 2 Test parameters of different particle types

实验组	岩块材料	堆积密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	冲击高 度/cm	冲击压力 F_1/N
A_1	鹅卵石	1 937.5	10	1 039
B_1	混合岩块	1 500	10	1 110
C_1	石灰石	1 250	10	1 354
A_2	鹅卵石	1 937.5	20	1 604
B_2	混合岩块	1 500	20	1 720
C_2	石灰石	1 250	20	1 834

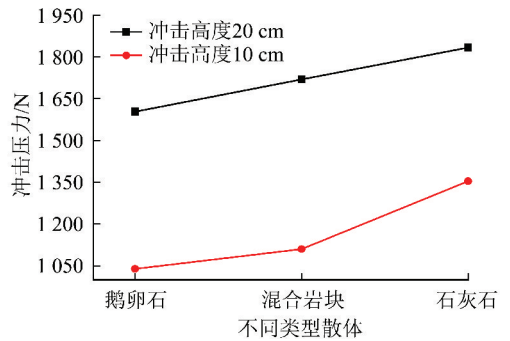


图 4 不同类型散体冲击效果

Fig. 4 Impact effect of different particle types

实验发现,破碎岩石在相同冲击压力下,缓冲效果与散体本身性质有关。由于石灰石和鹅卵石形状不相同,石灰石形状不规则,表明棱角明显,鹅卵石表面光滑,无棱角。所以在实验过程中,在堆积相同高度下,两种散体的质量不相同,石灰石的质量要小于鹅卵石的质量,因此石灰石的堆积密度要小于鹅卵石的堆积密度。在鹅卵石和石灰石混合缓冲材料中,其堆积密度要介于石灰石和鹅卵石堆积密度之间。对比实验效果发现,堆积密度是影响岩石缓冲效果的一个重要因素,即在岩石粒径相等,本身性质基本一致

情况下,散体表面越光滑,堆积密度越大,缓冲效果越明显,相反,则缓冲效果越差。

不同堆积密度散体的冲击力时程曲线如图5所示,研究发现在重锤冲击高度为10 cm的冲击力时程曲线中,3种破碎岩石波动性基本一致,出现两个大小不一的波峰和两个波谷。在曲线中出现波谷的主要原因是整个实验过程中,上部产生冲击力较大,破碎的岩石和液压千斤顶以及地面在受到冲击以后,给上部承载箱以反弹力,导致部分与传感器分离,使采集到的冲击压力 F 值小于本身质量。波峰越高,波谷就越低,主要因为冲击力越大,下部产生的反弹力就越大,使其采集的压力值就越小。

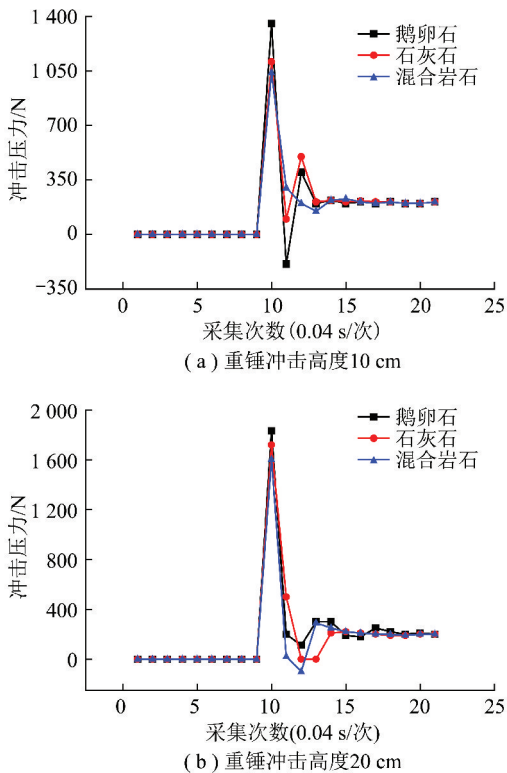


图5 不同岩块堆积密度下的冲击力时程曲线
Fig. 5 Curves of impact force vs acquisition times under different particle packing density

2.2 不同散体厚度动载冲击实验

在放顶煤工作面中,不同煤层厚度或不同采放比条件下,散体顶煤厚度不相同,经过散体顶煤缓冲后采集到的载荷也不相同,为揭示散体顶煤厚度对顶板动载的缓冲作用,设计了不同厚度情况下的冲击实验。在实验中选取了粒径大小为1~2 cm青色石灰石为研究材料,实验过程中,在承载箱中改变堆积厚度,分别为5,10,15,20 cm,选取重锤进行垂直冲击,冲击高度分别为10,20 cm。设置相同初撑力的液压缸(10 kN)模拟液压支架,为了消除实验误差,每种散体材料相同高度冲击次数大于20,传感器采集的

有效数据取平均值。该实验一共分为8组,即 $D_1, D_2, D_3, D_4, D_{11}, D_{22}, D_{33}, D_{44}$,实验方案和采集压力峰值数据如表3和图6所示。

表3 不同散体堆积厚度冲击实验

Table 3 Impact tests parameters of different particle packing thickness

实验组	冲击高度	堆积厚度/cm	冲击压力 F_1/N
D_1	10	5	1 872
D_2	10	10	1 595
D_3	10	15	1 200
D_4	10	20	1 115
D_{11}	20	5	2 738
D_{22}	20	10	2 076
D_{33}	20	15	1 544
D_{44}	20	20	1 540

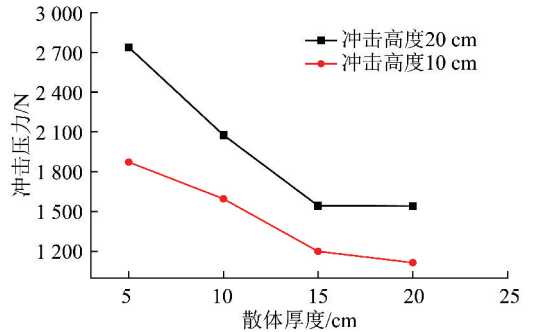


图6 不同散体厚度冲击效果

Fig. 6 Impact effect of different packing thickness

分析实验数据发现,相同的重锤冲击高度下,不同的散体堆积厚度获得各组冲击压力不同,并且随着岩块的堆积厚度逐渐增加,冲击压力逐渐减小。重锤冲击高度10 cm时,每次冲击压力的减幅不同,实验组 D_1 和 D_2 冲击压力之间的差值为277 N,实验组 D_2 和 D_3 冲击压力之间的差值为395 N,而 D_3 和 D_4 之间冲击压力之间的差值为85 N,通过对比各实验组之间的差值,发现随着散体堆积高度的不断增加,上述冲击压力差值逐渐减小,并且逐渐趋于零,表明散体厚度增大到一定时,对顶板破断或失稳形成的动载荷减缓是有限的。当冲击高度增加到20 cm时,实验组 D_{11} 和 D_{22} 冲击压力之间的差值为660 N,实验组 D_{22} 和 D_{33} 冲击压力之间的差值为532 N,而 D_{33} 和 D_{44} 之间冲击压力之间的差值为2 N,通过对比上述的3个差值发现,压力差值随着散体厚度的增加逐渐减小,并且逐渐趋近于零,这与冲击高度10 cm时的变化规律类似。当散体厚度相同而重锤冲击高度不同时,冲击每种厚度散体所获得的冲击压力大小不同,冲击高度越大,获得的冲击压力越大;并且随着散

体厚度增加,冲击压力减小,表现为随着冲击高度造成的冲击压力差值减小。这说明,随着散体厚度的增加,因冲击高度造成的冲击压力不同而传递给液压缸的冲击压力的差别越来越小,说明散体顶煤对厚度对于减缓顶板动载荷作用是显著的。

分析上述测试结果,证明散体顶煤的厚度是影响液压支架上部所承受动载荷缓冲效果的一个重要因素;上部动载荷缓冲效果随着破碎岩石堆积厚度的增加而更加的显著,但当散体堆积厚度超过一定值时,再增加堆积岩块的厚度,相同重锤冲击高度下,所采集的冲击压力变化不大,堆积厚度缓冲效果减弱并且趋于平稳。堆积厚度对于减缓顶板动载荷的效应出现了临界值,说明在特厚煤层进行放顶煤开采时,破碎充分的厚松散顶煤可以有效减缓顶板冲击,计算顶板载荷时可以按照静载荷进行处理。

通过不同岩块堆积厚度的冲击力时程曲线,如图 7 所示,研究发现实验 D_1 的曲线在这实验中波动性最大,并且分别出现了两个明显的波峰和波谷,波动历程也是相对较长,证明在缓冲过程中实验 D_1 缓冲相对复杂,主要是散体堆积的厚度较薄,吸收上部冲击能量能力有限,导致整个实验波动性较大,通过多次的波动冲击,从而减小冲击压力的影响。而实验 D_2 的曲线波动性相比于实验 D_1 的曲线较平稳,分别只出现了一个明显的波峰和波谷,波动历程相对较短,主要是实验 D_2 中,岩块的堆积厚度比实验 D_1 的堆积厚度厚,所堆积的岩块厚度有效的减缓了上部产生的冲击载荷,波动性也就随之减小,上部产生的冲击载荷能量在岩石内部缓冲了大部分,从而降低了液压支架所承受的压力。实验 D_3 的曲线同样分别出现了一个波峰和波谷,较上两次实验,波动性平稳,波动缓冲时间较短,主要是这次实验岩石的厚度比上两次要厚,缓冲上部冲击载荷的能力再次增强。而实验 D_4 的曲线波动性与实验 D_3 的曲线基本一致,波动性较平稳,主要因为实验 D_4 的堆积厚度超过了岩石堆积厚度缓冲效果的临界厚度,从而对增加上部冲击压力缓冲效果不明显。如图 8 所示,当冲击高度增加到 20 cm 时,4 种冲击方案获得的曲线波动性类似于冲击高度 10 cm 时曲线波动形式,不同的是采集到的四种方案曲线的一致性较好,分析其原因是当冲击力达到一定时,不同散体堆积厚度对冲击力影响差别减弱。

综上所述,这两次不同冲击高度的实验进一步证明了散体堆积厚度是影响动载荷缓冲效果的一个重要因素。实验过程中,当岩石堆积厚度越厚,冲击力越小,缓冲效果越明显。当达到一定厚度以后,冲击

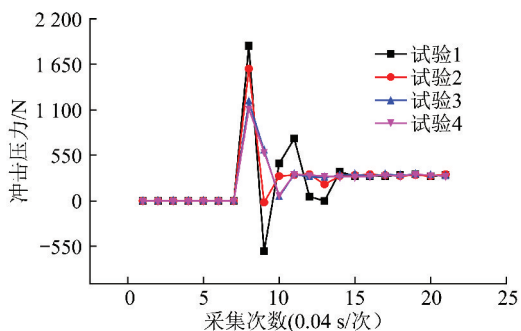


图 7 冲击高度 10 cm 散体的冲击力时程曲线

Fig. 7 Curves of impact force vs acquisition times under 10 cm impact height

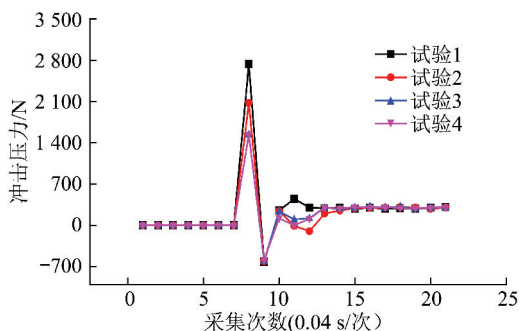


图 8 冲击高度 20 cm 散体的冲击力时程曲线

Fig. 8 Curves of impact force vs acquisition times under 20 cm impact height

压力不在变化,岩石缓冲效果逐渐趋于平稳。说明厚度变化有个临界值,当堆积厚度小于临界值时,冲击压力随着堆积厚度的增加而逐渐减小,破碎岩石堆积厚度缓冲效果越明显,当堆积厚度大于临界值时,冲击压力随着堆积厚度的增加而逐渐趋于不变。在实际生产中发现,厚顶煤工作面液压支架载荷并不大,并且多表现出支架前柱阻力要较后柱大,在软煤层综放面更加突出;而在薄顶煤工作面,支架载荷更接近类似条件综采工作面,有时会存在明显动压,这与实验结果是吻合的,认为顶煤在缓冲顶板载荷方面存在临界厚度。

2.3 顶煤破碎度缓冲动载荷实验

在实际生产过程中,由于煤体裂隙和强度不同,以及工作面开采条件不同,使顶煤在矿山压力和支架的反复支撑下破碎块度不同,进而影响顶板载荷的传递。为了研究顶煤破碎程度对于动载荷缓冲效果的影响,设计了重锤冲击不同破碎程度岩石的动载荷实验。采用同种材料,不同粒径的白色鹅卵石,两种鹅卵石粒径大小分别是 1~2 cm 和 3~4 cm。两种粒径不同的鹅卵石在承载箱中堆积厚度选取 10 cm。选取重锤进行垂直冲击,冲击高度分别为 10, 20 cm。整个实验过程中,采用相同支撑压力的液压缸

(5 kN), 压力传感器进行实时采集, 为了保证数据的精确度, 每种岩石材料相同高度冲击 20 次以上, 采集的有效数据取平均值。将实验共分为 4 组, 即 Z_1 , Z_2 , Z_3 , Z_4 。采集压力峰值数据见表 4, 不同粒径岩块下的冲击力时程曲线如图 9 所示。

表 4 不同粒径大小岩石冲击实验参数

Table 4 Impact tests parameters of different particle sizes

实验组	粒径大小/cm	冲击高度 h /cm	冲击压力 F_1 /N
Z_1	1~2	10	1 039
Z_2	3~4	10	893
Z_3	1~2	20	1 604
Z_4	3~4	20	1 319

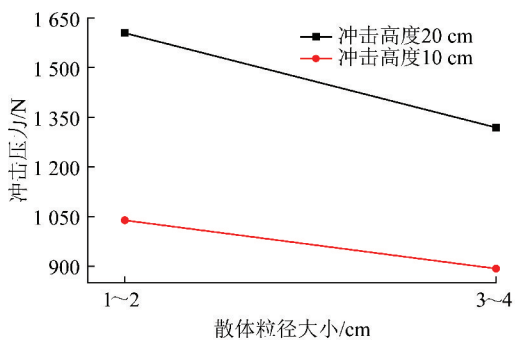
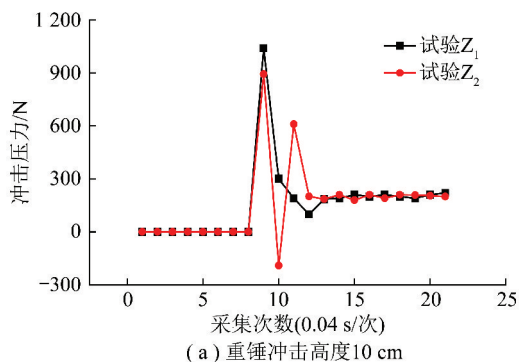


图 9 不同散体粒径冲击效果影响

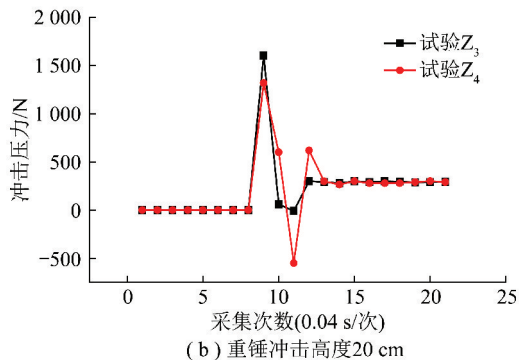
Fig. 9 Impact effect of different particle sizes

通过上述实验研究发现, 在散体性质, 冲击强度, 堆积厚度等一定时, 散体粒径是对上部冲击载荷减缓的一个因素。当粒径越大时, 液压千斤顶所承受的上部冲击压力就越小, 缓冲效果越明显, 但在其缓冲过程中, 缓冲曲线的波动性较大, 表明冲击过程中比较剧烈, 造成实验过程中承载箱不稳定 (图 10)。主要是由于岩块粒径较大时, 散体之间裂隙较大, 在外力作用下散体颗粒可移动空间较多, 则散体颗粒之间碰撞更为剧烈。综合上述实验发现, 破碎后的散体煤体是大量离散而又相互作用的复杂体系, 在支架后部放煤过程中, 散体顶煤逐渐流动而放出, 煤块之间通过力链形式传递相互之间作用; 在顶煤流动之前, 顶煤破碎之后仍然比较整齐的排列, 整齐排列的流动散体顶煤煤块之间的分界面位置与顶煤强度、裂隙发育程度等相关, 一般软煤条件可以将支架上方的顶煤假设成散体状态。因此很难用一种模型准确描述散体顶煤在支架与围岩关系中的作用, 所以借助实验设备的研发和散体材料冲击实验初步分析了散体顶煤在综放支架与围岩关系中的作用。下一步将在综放工作面支架与围岩相互作用的理论模型进行深入研究, 并确定基于散体顶煤厚度、破碎块度、煤层赋存和开采

条件等多因素的综放工作面顶板载荷估算方法, 为设备选型提供依据。



(a) 重锤冲击高度 10 cm



(b) 重锤冲击高度 20 cm

图 10 不同粒径岩块下的冲击力时程曲线

Fig. 10 Curve of impact force vs acquisition times under different particle sizes

3 结 论

(1) 研发了可模拟散体顶煤冲击实验的动载荷冲击实验平台, 包括用于产生冲击力的重锤、用于承载散体材料的透明承载箱、模拟液压支架的液压缸、用于采集冲击载荷的压力传感器, 以及数据采集系统等, 成功模拟了不同散体堆积厚度、堆积密度及不同粒径对上部动载荷缓冲影响。

(2) 模拟实验发现, 散体顶煤的堆积密度越大, 散体缓冲上部动载荷效果越明显; 散体堆积厚度变化存在临界值, 当堆积厚度小于临界值时, 破碎岩石堆积厚度缓冲效果越明显, 相反冲击压力随着堆积厚度的增加而逐渐趋于不变。

(3) 散体粒径越大, 岩石缓冲上部动载荷效果越明显, 但缓冲曲线的波动性较大, 表明冲击过程中比较剧烈。原因主要是由于岩块粒径较大时, 散体之间裂隙较大, 在外力作用下散体颗粒可移动空间较多, 则散体颗粒之间碰撞更为剧烈。

(4) 在综放液压支架选型确定支护强度时, 不仅要考虑埋藏深度、顶板条件等, 还要综合考虑顶煤的厚度、破碎块度等因素, 并综合支架刚度、结构等对液压支架进行选型, 这是综放开采重要的研究内容。

参考文献(References):

- [1] 王家臣. 厚煤层开采理论与技术[M]. 北京:冶金工业出版社, 2009.
- [2] 曹胜根, 钱鸣高. 采场支架-围岩关系新研究[J]. 煤炭学报, 1998, 23(6): 575-579.
CAO Shenggen, QIAN Minggao. New research about support and surrounding rock relationship in working face[J]. Journal of China Coal Society, 1998, 23(6): 575-579.
- [3] 王家臣, 赵兵文, 赵鹏飞, 等. 急倾斜极软厚煤层走向长壁综放开采技术研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(2): 286-292.
WANG Jiachen, ZHAO Bingwen, ZHAO Pengfei, et al. Research on the longwall top-coal caving mining technique in extremely inclined and soft thick coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(2): 286-292.
- [4] 杨胜利, 王家臣, 杨敬虎. 顶板动载冲击效应的相似模拟及理论解析[J]. 煤炭学报, 2017, 42(2): 335-343.
YANG Shengli, WANG Jiachen, YANG Jinghu. Physical analog simulation analysis and its mechanical explanation on dynamic load impact[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(2): 335-343.
- [5] 王家臣, 王蕾, 郭尧. 基于顶板与煤壁控制的支架阻力的确定[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1619-1624.
WANG Jiachen, WANG Lei, GUO Yao. Determining the support capacity based on roof and coal wall control[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1619-1624.
- [6] 王家臣, 白希军, 吴志山, 等. 坚硬煤体综放开采顶煤破碎块度的研究[J]. 煤炭学报, 2000, 25(3): 238-242.
WANG Jiachen, BAI Xijun, WU Zhishan, et al. The research on the fractured blocks of the top-coal in the longwall top-coal caving technique of the hard coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(3): 238-242.
- [7] 王家臣, 陈忠辉, 白希军, 等. 坚硬厚煤层综放开采顶煤预爆破参数研究[J]. 煤, 2000, 9(3): 1-4.
WANG Jiachen, CHEN Zhonghui, BAI Xijun, et al. The research on the parameters of blasting the top-coal of longwall caving technique in the hard thick coal seam[J]. Coal, 2000, 9(3): 1-4.
- [8] 王家臣, 熊道慧, 方君实. 矿石自然崩落块度的拓扑研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(4): 443-447.
WANG Jiachen, XIONG Daohui, FANG Junshi. Study of mechanical behaviors during construction process of road tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(4): 443-447.
- [9] 吴健, 张勇. 综放采场支架-围岩关系的新概念[J]. 煤炭学报, 2001, 26(4): 350-355.
WU Jian, ZHANG Yong. The new concept of relationship between support and surrounding-rock in longwall top-coal caving faces[J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(4): 350-355.
- [10] 杨科, 刘千贺, 李志华. 厚松散层上提工作面覆岩运移与支架-围岩关系研究[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(10): 12-17.
YANG Ke, LIU Qianhe, LI Zhihua. Study on relationship between overburden strata migration in thick loose strata with extending upper extraction limit coal mining face and support-surrounding rock[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(10): 12-17.
- [11] 于斌. 大同矿区特厚煤层综放开采强矿压显现机理及顶板控制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
YU Bin. Study on strong pressure behavior mechanism and roof control of fully mechanized top coal caving in extra thickness seam in Datong coal mine[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.
- [12] 切尔尼亚克, 布尔恰可夫. 深井开采巷道矿压控制[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1985.
- [13] 徐连满, 潘一山, 曾祥华, 等. 巷道围岩破碎区吸能防冲性能研究[J]. 煤炭学报, 2015, 40(6): 1376-1382.
XU Lianman, PAN Yishan, ZENG Xianghua, et al. Study on the energy-absorbing cushion performance of roadway surrounding rock crushing zone[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(6): 1376-1382.
- [14] 季顺迎, 李鹏飞, 陈晓东. 冲击荷载下颗粒物质缓冲性能的试验研究[J]. 物理学报, 2012, 61(18): 184703.
JI Shunying, LI Pengfei, CHEN Xiaodong. Experiments on shock-absorbing capacity of granular matter under impact load[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(18): 184703.
- [15] 王光谦, 倪晋仁. 颗粒流研究评述[J]. 力学与实践, 1992, 14(1): 7-19.
WANG Guangqian, NI Jinren. Review of particle flow[J]. Mechanics in Engineering, 1992, 14(1): 7-19.
- [16] 孔亮. 基于颗粒物质力学与连续介质热力学的岩土本构模型初探[J]. 岩土力学, 2010, 31(S2): 1-6.
KONG Liang. Constitutive modeling for soils based on granular matter mechanics and continuous media thermomechanics[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(S2): 1-6.
- [17] 赵阳, 周辉, 冯夏庭, 等. 不同因素影响下下层间错动带颗粒破碎和剪切强度特性试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(1): 13-22.
ZHAO Yang, ZHOU Hui, FENG Xiating, et al. Particle crushing and shear behaviour of an infilled joint soil under different conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(1): 13-22.
- [18] MISHRA B K, MURTY C V R. On the determination of contact parameters for realistic DEM simulation of ball mills[J]. Powder Technology, 2001, 115: 290-297.
- [19] KRUGGEL-EMEDEN H, WIRTZ S, SCHERER V. Applicable contact model for the discrete element method; The single particle perspective[A]. Pressure Vessels and Piping Conference (PVP2008)[C]. Chicago, 2008.