崩落法采场顶板冒落冲击振动规律及振速预测方法研究*

李海[1],张刚刚[1],谭宝会[2],韩静[1],粟登峰[2],左琳[2],胡颖鹏[2]

(1.金川集团镍钴股份有限公司龙首矿, 甘肃 金昌市 737100;
2.西南科技大学 环境与资源学院, 四川 绵阳市 621010)

摘要:针对崩落法开采中顶板冒落所引起的冲击振动威胁采场稳定的难题,基于冒落冲击振动机理及物理模拟相似定律设计物理模拟试验,系统研究了冒落冲击振动速度与冒落体下落高度、一次冒落量、缓冲垫层孔隙率、缓冲垫层厚度、测点距离等五个因素的关系。结果表明:冒落冲击振速与冒落体下落高度、一次冒落量呈正相关,与缓冲垫层厚度、测点距离呈负相关,随缓冲垫层孔隙率增大呈先下降后上升的变化规律;冒落冲击振速与各因素相关程度由高到低依次为测点距离、一次冒落量、冒落体下落高度、垫层厚度、垫层孔隙率。基于试验结果及爆破振速计算方法,构建了冒落冲击振速测算经验公式,并将其应用于金川龙首矿西二采区。测算得出崩落法采场顶板冒落在1 595 m、1 554 m及1 494 m所能产生的最大振速分别为6.4 cm/s、3.7 cm/s、3.0 cm/s,现场实测值最大振速分别为1.21 cm/s、0.26 cm/s、0.09 cm/s,验证了测算方法的可靠性。研究结果可为地下矿山顶板冒落冲击灾害预防和控制提供理论依据和实践指导。

关键词:崩落法开采;顶板冒落;冲击振动速度;冲击灾害预防

中图分类号:TD853 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)05-0120-07

Study on Roof Caving Impact Vibration Law and Vibration Velocity Prediction Method of Caving Method Stope

Li Hai[1], *Zhang Ganggang*[1], *Tan Baohui*[2], *Han Jing*[1], *Su Dengfeng*[2], *Zuo Lin*[2], *Hu Yingpeng*[2]

(1.Longshou Mine, Jinchuan Group Nickel Cobalt Co., Ltd., Jinchang, Gansu 737100, China;
2.School of Environment and Resources, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China)

Abstract: Aiming at the problem that the impact vibration caused by roof caving threatens the stability of stope in caving mining, a physical simulation experiment was designed based on the mechanism of caving impact vibration and the similarity law of physical simulation. The relationship between the caving impact vibration velocity and the falling height of the caving body, the amount of one caving, the porosity of the cushion, the thickness of the cushion and the distance of the measuring point was systematically studied. The results show that the caving impact vibration velocity is positively correlated with the falling height of the caving body and the amount of one caving, and negatively correlated with the thickness of the cushion and the distance of the measuring point. With the increase of the porosity of the cushion, the caving impact vibration velocity decreases first and then increases. The correlation between the caving impact vibration velocity and each factor from high to low is the distance of the measuring point, the amount of one caving, the falling height of the caving body, the thickness of the cushion, and the porosity of the cushion. Based on the test results and the calculation method of blasting vibration velocity, an empirical formula for calculating the caving impact vibration velocity was constructed and applied to the west No.2 mining area of Jinchuan Longshou Mine. The maximum vibration velocities of roof caving at 1 595 m, 1 554 m and 1 494 m are 6.4 cm/s, 3.7 cm/s and 3.0 cm/s, respectively. The maximum vibration velocities measured in the field are 1.21 cm/s, 0.26 cm/s and 0.09 cm/s, respectively, which verifies the reliability of the measurement method. The research results can provide theoretical basis and practical guidance for the prevention and control of roof caving impact disasters in underground mines.

Key words: Caving mining, Roof caving, Impact vibration velocity, Impact disaster prevention

---

* **收稿日期**:2025-05-30
基金项目:四川省自然科学基金项目(2022NSFSC1089);西南科技大学博士基金项目(21zx7157)
作者简介:李海(1990—),男,甘肃靖远人,工程师,主要从事采矿技术及生产管理等方面的工作。E-mail:3087924240@qq.com
通信作者:谭宝会(1988—),男,陕西宝鸡人,博士,讲师,主要从事采矿方法及工艺的科研工作。E-mail:814405947@qq.com

0 引言

随着地下采矿的进行,当采场顶板围岩突发大规模失稳冒落时,强烈的冒落冲击振动将对井下工程稳定性造成威胁[1-3]。对于空场法而言,采场底板通常缺乏足够的缓冲垫层(散体矿岩)来吸收冒落冲击能量,采场顶板一旦失稳,所引发的冲击振动灾害较为严重[4-5]。采场顶板大规模冒落时,通过岩体间的相互冲击作用,冒落岩体的绝大部分势能转化为在岩层中传播的振动能,导致岩体发生形变,当井下工程难以承受这种形变时将发生破坏[6-8],且此类破坏通常具有瞬间性、急剧性、短暂性以及先兆不明显等特点。因此,探明冒落冲击振速传播规律并明确其测算方法,对预防和控制井下冒落冲击灾害至关重要。

在地下采矿顶板冒落冲击方面,相关学者开展了大量的研究工作。赵新等[9]以敦德铁锌矿为研究背景,采用数值模拟手段,研究了矿山采空区失稳冒落时有无覆盖层的冲击力学作用,研究结果表明,覆盖层可以有效减小冒落冲击作用,是井下预防冒落冲击灾害的有效措施。董川龙等[10]针对东升庙铜矿围岩垮落引发的空气冲击波问题,采用MATLAB差分计算以及空气动力学方法展开研究,结果表明,围岩垮落产生的冲击波最大速度可达38 m/s,设置2.7 m厚的混凝土阻波墙可有效提高防护效果。李光等[11]采用FLAC3D数值模拟手段,分析覆岩冒落的影响因素,发现采空区顶板为正方形时最易发生冒落,胶结充填体与上部覆岩产生的塑性区体积随侧压系数增加呈先增后降并逐渐趋于平缓稳定的趋势,研究认为采空区侧压系数较大时塑性区不易发生冒落。朱仕强等[12]通过物理试验研究了冒落冲击振速与散体垫层孔隙率之间的关系,试验结果表明,随着垫层孔隙率的增加,其缓冲作用逐渐增强,孔隙率大于50%时缓冲作用最佳。莫超等[13]通过相似模型试验,研究了矿山开采过程中不同条件下顶板冒落对下部采场冲击振动的影响,结果表明,振动速度随冒落高度的增大而增大,且二者之间存在着突变期,突变期内振动速度增长最快。上述研究为地下采场顶板冒落冲击灾害的防控提供了有益指导。

本文基于一系列相似物理模拟试验,研究了冒落冲击振速与冒落体下落高度、一次冒落量、缓冲垫层孔隙率、缓冲垫层厚度、测点距离等五个影响因素之间的作用关系。在此基础上,构建了冒落冲击振动速度测算经验公式,并在现场进行了应用和验证。研究结果可为地下采场顶板冒落冲击灾害的预防和控制提供指导。

1 冒落冲击振动机理及缓冲垫层减振机制

1.1 冒落冲击振动机理

采场顶板突发大面积冒落时,一次冒落岩体质量巨大,通常可达数千吨乃至上万吨。冒落岩体从一定高度下落,产生的冲击动能极大,其中部分动能压缩采空区空气做功并形成冲击气浪,其余动能将转化为对采场底板的冲击功,以振动能的形式在岩体中传播,加剧了冒落冲击的危害。冒落冲击振动对井下工程产生的破坏形式主要表现为以下两种形式:一是以冲击动能形式直接对采场底部结构造成破坏,使采场底部工程发生失稳;二是冲击动能在岩体内部以冲击波的方式进行传播,遇到井下工程时,会对其产生荷载,当荷载超过工程强度时,井下工程发生破坏。冒落冲击动能以纵波和横波的方式在岩体中传播,其中纵波使岩体发生拉压变形,横波使岩体发生剪切变形。

综上所述,降低冒落振动在岩体中的传播速度能够有效控制由顶板冒落所引起的冲击振动伤害。

1.2 缓冲垫层减振机制

在崩落法中,采场底板通常堆积有崩落或者冒落的矿石散体作为缓冲垫层。这些散体通常具有以下物理力学特征:块体尺寸差异较大;块体间孔隙率较大;受冒落冲击后易发生二次破碎;具有一定的抗压与抗剪能力,但无法承受拉应力。

在崩落法开采中,利用采场底板预留的崩落散体作为缓冲垫层,是预防冒落冲击灾害的常用手段。散体垫层的减振机理主要体现在以下四个方面:(1)散体垫层在受到冒落体冲击前具有一定的孔隙率,当其受到冒落冲击时被压密,在此过程中使得大部分冒落冲击能量被消耗;(2)采空区内存在散体垫层时,相当于减小了采空区的高度,从而降低了冒落岩体的冲击能量;(3)缓冲垫层受冲击发生二次破碎时,部分冲击能量被耗散;(4)在冒落体与缓冲垫层的碰撞过程中,部分冲击能量转化为热能、辐射能等形式而被耗散。

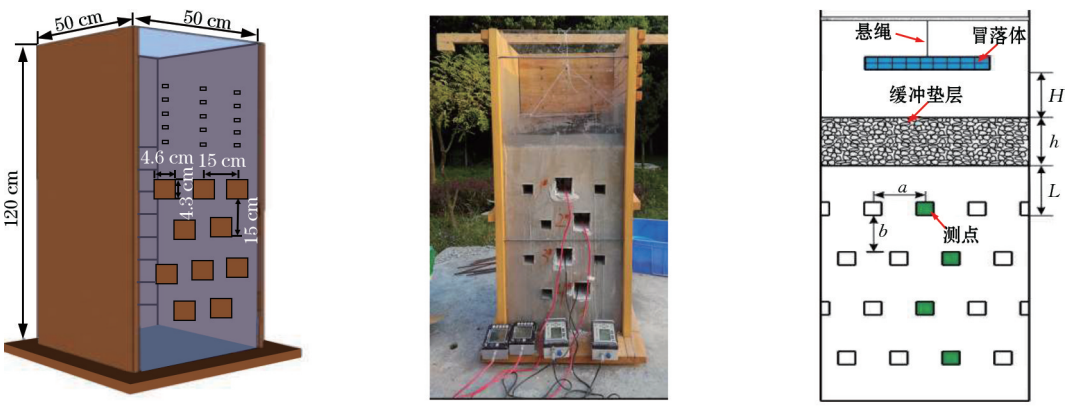
2 冒落冲击振动物理试验研究

2.1 物理模型及试验方案

为研究冒落冲击振动能量在岩体中的传播规律,以无底柱分段崩落法采场结构为工程背景,采用物理相似模拟试验方法,研究了冒落冲击振速与冒落体下落高度、一次冒落量、缓冲垫层孔隙率、缓冲垫层厚度及测点距离等五个影响因素之间的作用关系。物理模型比例为 1∶100,模型高度为 120 cm,长和宽均为 50 cm。模型布置有 4 个分段,分段高度为 15 cm,进路间距为 15 cm,进路高度和宽度分别为 4.3 cm 和 4.6 cm,模型设计图如图 1(a)所示。

模型中模拟矿体的材料以金川集团镍钴股份有限公司龙首矿西二采区矿体为目标材料进行相似度配比。根据相似理论,模型材料的抗压强度为 0.233～9.800 MPa,抗拉强度为 0.096～0.129 MPa,弹性模量为 0.3～2.8 GPa。文献[14]开展岩体冒落相似材料物理试验时配比了 25 组试样,其中一组试样的力学参数为:弹性模量为 585.9 MPa,抗压强度为 1.764 MPa,泊松比为 0.329,抗拉强度为 0.120 MPa。该组材料的力学性能最接近本次试验目标材料强度,因此,在本次试验中选取该组材料的配比模拟岩体材料。试验过程中,采用磁铁矿颗粒模拟散体缓冲垫层,其粒径范围为 0.1～2.0 cm,采用多组铁片模拟采场顶板冒落体。试验前将铁片悬挂在缓冲垫层顶部,剪断绳索,使铁片自由下落冲击散体垫层。同时,在采场 4 个分段回采进路中各布置一台振速监测仪,分别监测冒落冲击在各分段所产生的振速。测点位置如图 1(b)所示,试验原理如图 1(c)所示。

本次物理试验设计了 4 个试验系列,共 28 组试验方案,试验方案见表 1。在同一系列中,仅调整该系列研究因素的取值,其余因素的取值保持不变,每组试验进行 3 次,将 3 次试验结果的平均值作为最终结果。



(a) 模型三维设计图 (b) 监测点分布 (c) 试验原理

图 1 模型及试验原理

Fig.1 Model and test principle

表 1 试验方案设计

Table 1 Test schemes design

试验系列	方案编号	垫层厚度/cm	垫层孔隙率/%	冒落体下落高度/cm	一次冒落量/kg
Ⅰ	Ⅰ-1	5	47.0	20	5.9
	Ⅰ-2	5	48.5	20	5.9
	Ⅰ-3	5	50.0	20	5.9
	Ⅰ-4	5	51.5	20	5.9
	Ⅰ-5	5	52.5	20	5.9
	Ⅰ-6	5	54.0	20	5.9
	Ⅰ-7	5	55.5	20	5.9
Ⅱ	Ⅱ-1	5	50.0	20	5.9
	Ⅱ-2	5	50.0	20	11.8
	Ⅱ-3	5	50.0	20	17.7
	Ⅱ-4	5	50.0	20	23.6
	Ⅱ-5	5	50.0	20	29.5
Ⅲ	Ⅲ-1	5	50.0	20	5.9
	Ⅲ-2	5	50.0	25	5.9
	Ⅲ-3	5	50.0	30	5.9
	Ⅲ-4	5	50.0	35	5.9
	Ⅲ-5	5	50.0	40	5.9
Ⅳ	Ⅳ-1	0	50.0	20	5.9
	Ⅳ-2	1	50.0	20	5.9
	Ⅳ-3	2	50.0	20	5.9
	Ⅳ-4	3	50.0	20	5.9
	Ⅳ-5	4	50.0	20	5.9
	Ⅳ-6	5	50.0	20	5.9
	Ⅳ-7	6	50.0	20	5.9
	Ⅳ-8	7	50.0	20	5.9
	Ⅳ-9	8	50.0	20	5.9
	Ⅳ-10	9	50.0	20	5.9
	Ⅳ-11	10	50.0	20	5.9

2.2 试验结果及分析

上述 28 组试验完成后,得到各系列试验中各测点的冲击振速变化曲线,如图 2 所示。

由图 2(a)可知,随散体孔隙率持续增大,冒落冲击振动速度呈现先逐渐下降后逐渐上升的变化趋势。具体而言,当散体垫层孔隙率由 47.0%增大至 52.5%时,冒落冲击振动速度表现出逐渐降低的趋势,当散体垫层孔隙率由 52.5%增大至 55.5%时,冒落冲击振动速度转而抬升。上述变化趋势表明,孔隙率增大至超过一定界限时,散体垫层颗粒尺寸增大、数量减少,受冲击时颗粒间的挤压、碰撞及压缩作用减弱,导致其对冲击能量的吸收能力下降。因此,缓冲垫层孔隙率过小或过大均不利于减振,确保散体垫层具有适中的孔隙率,才能更好地发挥其缓冲减振作用。

由图 2(b)和图 2(d)可知,冒落体下落高度和一次冒落量均与冒落冲击振动速度呈现明显正相关关系,表明缩减顶板冒落高差和控制一次冒落量是预防冒落冲击灾害的有效措施。

由图 2(c)可知,冒落冲击振速随缓冲垫层厚度增大而减小,二者呈明显负相关关系,表明在采场底板预留足够的散体缓冲垫层可以有效预防冒落冲击振动灾害。试验结果进一步表明,当垫层厚度增至一定程度后,冲击振速降幅逐渐减小,表明预留合理厚度的缓冲垫层厚度可有效起到控制冲击振速的作用,而当缓冲垫层厚度过大时,反而会占用冒落空间,限制顶板冒落,不利于地压的及时释放。

此外,综合图 2 分析可以看出,距离冒落冲击点越远,冲击振速越小,表明冒落冲击振速与测点距离呈负相关关系,即增大保护工程与冒落冲击点的距离有利于控制冒落冲击灾害。

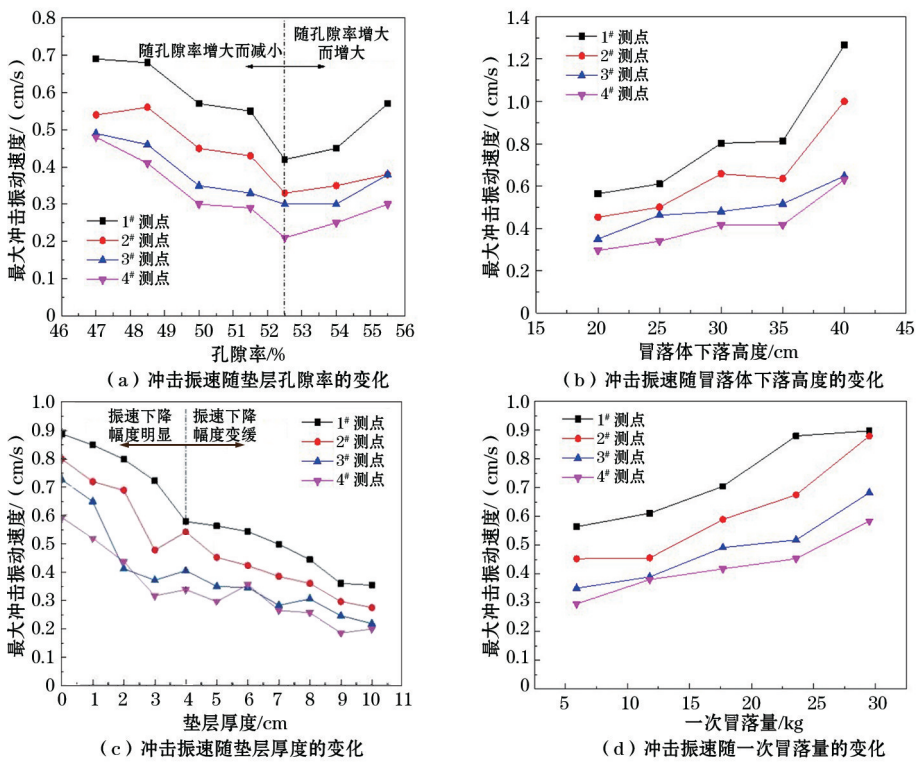


图 2 冲击振速随各影响因素的变化曲线

Fig.2 Variation curves of impact vibration velocity with various influencing factors

3 冒落冲击振速计算方法构建

为进一步量化表征冒落冲击振速与各影响因素之间的相关程度,便于研究结果能够更加明确、清晰地指导采矿实践,采用数据分析软件对试验数据进行分析,得到了各影响因素与冒落冲击振速的相关性系数,见表 2。

表 2 各影响因素相关性系数

Table 2 Correlation coefficients of various influencing factors

影响因素	相关性系数
孔隙率	−0.901
冒落体下落高度	0.923
垫层厚度	−0.920
一次冒落量	0.942
测点距离	−0.976

由表 2 可知,测点距离与冒落冲击振速相关性最为显著,各影响因素与冲击振速相关程度从高到低依次为测点距离、一次冒落量、冒落体下落高度、垫层厚度、孔隙率。该结论可为实际采矿工程中制定更为有效、灵活的冲击灾害防控措施提供依据。

提前预测拟保护地点的冒落冲击最大振速对于井下工程防护与冒落灾害控制具有重要意义。鉴于此,本文基于上述物理试验结果,结合相关文献中提出经验公式[15],确定冒落冲击振速的计算公式如下:

$$V=\frac{(k\delta^2+t)(mgH\cdot 10^{-6})^{\alpha}}{L^{\beta}h^{\lambda}} \tag{1}$$

式中:V 为冒落冲击振速,cm/s;h 为采空区底板散体厚度,m;m 为一次冒落岩体质量,kg;H 为冒落体下降高度,m;g 为重力加速度,m/s^2;L 为采空区底板与保护工程之间的距离,m;δ 为散体缓冲垫层孔隙率,%;α、λ、t、k、β 为回归系数。

采用式(1)对物理试验数据进行回归分析,最终得到用于测算冒落冲击振速的经验公式:

$$V=\frac{(-0.176\delta^2+1)(mgH\cdot 10^{-6})^{0.389}}{L^{0.217}h^{1.063}} \tag{2}$$

式(2)可用于计算拟保护工程地点处,崩落法采场顶板冒落时产生的冲击振动速度。

4 案例分析

龙首矿是我国重要的镍矿石生产基地,下辖东、中、西三个采区。其中,西二采区原采用双中段同时开采的下向分层进路式胶结充填法进行开采。2016 年,由于上部中段发生直通地表的采场垮塌冒落事故,加之西二采区本身为贫矿资源且当时镍价持续下行,综合多方面因素考虑,矿山决定采用无底柱分段崩落法回采上部中段剩余的 600 余万 t 矿体,而下部中段则继续沿原下向分层进路式胶结充填法进行开采,西二采区采场布置如图 3 所示。

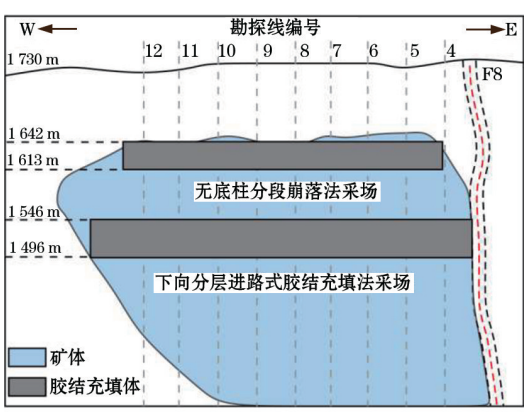


图 3 西二采区双中段回采方案

Fig.3 The dual-level mining scheme in west No.2 mining area

上部中段由充填法向崩落法过渡时,通过崩落法首采分段开采形成大规模连续采空区,促使顶板胶结充填体在地压作用下发生自然冒落,形成散体覆盖层。西二采区矿体平面回采面积达 3×10^4 m^2,巨大的采空区面积足以使顶板发生失稳冒落[16]。在覆盖层形成过程中,首采分段的出矿量需要严格控制在崩落矿石总量的 30%以内,其余矿石暂留在采场底板作为缓冲垫层,预防顶板冒落冲击危害。

上部中段崩落法开采前,需预先研判崩落法采场顶板大面积冒落对井下关键工程产生的冲击振动影响。若发现顶板冒落可能会对井下工程稳定性产生不利影响时,应及时调整回采方案,将不利影响控制在可接受范围内,这对于维持整个西二采区的采矿安全至关重要。在崩落法开采过程中,需尤为关注崩落法采场、1 554 m 水平充填回风工程以及 1 494 m 下部中段充填采场三个部位的稳定性。由于这三个部位从上至下基本覆盖了西二采区的关键作业面,测算结果对西二采区的稳定性分析具有代表性作用。因此,采用本文提出的冒落冲击振速测算经验公式,对三个部位的冲击振速进行测算。

考虑岩体冒落产生的冲击振动波与采场爆破产生的冲击振动波在矿岩中的传播规律相似,本研究参照《爆破安全规程》(GB 6722—2014)规定的安全振动速度允许值,对井下目标保护工程的稳定性进行研判。

根据文献[17]测算,龙首矿西二采区崩落法采场顶板的最大冒落等价圆直径为 45 m。考虑到充填体上覆岩层(50 m 厚氧化矿与 50 m 厚第四系表土)强度均较低,且原上部中段充填采场垮塌时已贯通地表,因此,认为最大冒落等价圆范围内的岩体可能会发生贯通地表的柱状陷落。由此计算得到最大一次冒落量岩体质量 m 约为 5.11×10^8 kg。同时,首采分段按 30%崩落矿石总量进行控制出矿后,预留的矿石缓冲垫层厚度 h 为 7.5 m,根据中深孔崩落的矿石块度取矿石散体垫层的孔隙率 δ 为 0.5,冒落高度 H 为 12 m,冒落体冲击点与崩落法采场回采进路的距离 L_1 取 3 m,将以上数据代入式(2)中,计算得到顶板冒落时,采场内产生的最大冲击振速为 6.4 cm/s。

1 554 m 水平为下部中段充填采场的充填回风水平,对于维持 1 494 m 水平的正常生产至关重要。崩落法采场顶板冒落冲击采场底板时,距 1 554 m

水平的垂直距离 L_2 为 40 m,将相关参数代入式(2),计算得到顶板冒落在 1 554 m 水平产生的最大振速为 3.7 cm/s。

此外,崩落法采场顶板冒落冲击采场底板时,与下部中段充填采场作业水平(1 494 m)之间的垂直距离 L_3 为 100 m,将相关参数代入式(2),计算得到顶板冒落在下部中段充填法采场能够产生的最大振速为 3.0 cm/s。

分析结果表明,当顶板冒落时,崩落法采场(巷道)、1 554 m 水平充填回风工程(巷道)以及下部中段充填采场(大体积混凝土)所能产生的最大冲击振速分别为 6.4 cm/s、3.7 cm/s 以及 3.0 cm/s。上述数值均满足《爆破安全规程》(GB 6722—2014)中对井下矿用巷道(小于 20～30 cm/s)或大体积混凝土(小于 10～12 cm/s)的振动速度限值要求。

为了掌握崩落法采场顶板冒落过程在崩落法采场及下部中段充填采场实际所产生的最大冲击振动速度,在西二采区布设了微震监测系统,同时在崩落法采场 1 595 m 分段、1 554 m 充填回风水平、1 494 m 水平分别布置了爆破振动速度监测仪。利用微震监测系统监测崩落法采场顶板大规模冒落事件的时间及位置[18],爆破振动速度监测仪监测冒落冲击在各监测点产生的最大振动速度。

现场监测结果表明,覆盖层形成过程中,采场顶板冒落在崩落法首采分段产生的最大振速为 1.21 cm/s,在 1 554 m 充填回风水平产生的最大振速为 0.26 cm/s,在 1 494 m 水平产生的最大冒落冲击振速为 0.09 cm/s,各水平关键工程在覆盖层形成过程中均保持稳定,实测振速与理论测算及微震监测结果吻合良好。由此可见,本文提出的冒落冲击振速测算方法具有较好的准确性和可靠性,可用于指导工程实践。

5 结论

(1) 冒落冲击振速与一次冒落量、冒落体下落高度呈正相关,与测点距离、缓冲垫层厚度呈负相关,冒落冲击振速随缓冲垫层孔隙率增大呈先下降后上升的变化规律。各因素与冒落冲击振速的相关程度从高到低依次为:测点距离、一次冒落量、冒落体下落高度、垫层厚度、垫层孔隙率。该结论可为实际采矿中的冲击灾害预防和控制提供有效依据。

(2) 基于物理试验结果,构建了测算冒落冲击振动速度的经验公式。以金川龙首矿西二采区为例,测算得到崩落法采场顶板冒落在采场、1 554 m 水平及 1 494 m 水平产生的最大振动速度分别为 6.4 cm/s、3.7 cm/s 和 3.0 cm/s。采用微地震监测系统、振速监测系统对冒落冲击振动跟踪监测,实测崩落法采场、1 554 m 水平、1 494 m 水平振动速度最大值分别为 1.21 cm/s、0.26 cm/s、0.09 cm/s,验证了本文所提的冒落振速测算方法的可靠性。

(3) 物理试验及振速测算方法未充分考虑矿岩节理、充填体不接顶空隙、采矿工程等因素对冲击振速的衰减作用,后续研究应加强此方面工作,以进一步提高测算结果的精准性。

参考文献(References):

[1] 赵新,刘明,史峰.采空区覆盖层对顶板大规模冒落冲击灾害的防治研究[J].黄金,2023,44(8):21-25.
Zhao Xin, Liu Ming, Shi Feng. Study of the prevention and control of large-scale impact disaster caused by roof caving with goaf overburden[J].Gold,2023,44(8):21-25.

[2] 童玉升,李士超,王攀,等.无底柱分段崩落采矿法地压显现规律数值模拟分析[J].黄金,2022,43(6):32-34+44.
Tong Yusheng, Li Shichao, Wang Pan, et al. Numerical simulation analysis of ground pressure appearance law of pillarless sublevel caving method[J].Gold,2022,43(6):32-34+44.

[3] 任凤玉,张晶,何荣兴,等.复杂条件下不规则空区围岩冒落时空演化特征研究[J].金属矿山,2022(3):28-34.
Ren Fengyu, Zhang Jing, He Rongxing, et al. Study on the temporal and spatial evolution characteristics of surrounding rock caving in irregular goaf under complex conditions[J]. Metal Mine,2022(3):28-34.

[4] 张东杰,刘泽宇,段晓博,等.复合采空区覆岩冒落机理及其协同治理方法研究[J].矿业研究与开发,2024,44(4):91-96.
Zhang Dongjie, Liu Zeyu, Duan Xiaobo, et al. Research on the mechanism of overlying strata caving in composite goaf and its collaborative treatment method[J].Mining Research and Development,2024,44(4):91-96.

[5] 高天宇,马麟.锡铁山铅锌矿采空区治理方案优选[J].现代矿业,2021,37(9):80-83.
Gao Tianyu, Ma Lin. Optimization of the goaf governance program in Xitieshan lead-zinc mine[J]. Modern Mining, 2021,37(9):80-83.

[6] 陈杰,任金武,辛亚军.超长综采工作面矿压显现规律研究[J].煤炭技术,2022,41(10):10-14.
Chen Jie, Ren Jinwu, Xin Yajun. Study on underground pressure manifestation law of ultra-long fully-mechanized working face[J]. Coal Technology,2022,41(10):10-14.

[7] 张艺耘,李成海,唐磊,等.深部超长工作面矿震响应规律及传播机制研究[J].矿业研究与开发,2024,44(9):9-17.
Zhang Yiyun, Li Chenghai, Tang Lei, et al. Response law and propagation mechanism of mine earthquakes in deep and ultra-long working face [J]. Mining Research and Development,2024,44(9):9-17.

[8] 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.

[9] 赵新,刘明,史峰.采空区覆盖层对顶板大规模冒落冲击灾害的防治研究[J].黄金,2023,44(8):21-25.
Zhao Xin, Liu Ming, Shi Feng. Study on the prevention and control of large-scale impact disaster caused by roof caving with goaf overburden[J].Gold,2023,44(8):21-25.

[10] 董川龙,姚有利,程虹铭.东升庙铜矿采空区围岩大面积垮落冲击波致灾原理与防治[J].煤矿开采,2018,23(5):95-99+122.
Dong Chuanlong, Yao Youli, Cheng Hongming. Shock wave disaster-causing mechanism and prevention by goaf surrounding rock large area collapse of Dongshengmiao copper mine[J].Coal mining Technology,2018,23(5):95-99+122.

[11] 李光,张军,任海龙,等.充填法转崩落法开采中覆岩冒落影响因素的数值模拟分析[J].现代矿业,2020,36(3):36-38+52.
Li Guang, Zhang Jun, Ren Hailong, et al. Study on the influencing factors of overlying rock caving in filling method transition to caving method[J]. Modern Mining, 2020, 36(3):36-38+52.

[12] 朱仕强,陈星明,樊露,等.诱导冒落冲击振动规律相似实验研究[J].化工矿物与加工,2019,48(6):27-31+51.
Zhu Shiqiang, Chen Xingming, Fan Lu, et al. Experimental study on similarity of induced caving shock vibration law[J]. Industrial Minerals & Processing,2019,48(6):27-31+51.

[13] 莫超,陈星明,贾达,等.矿山开采过程中顶板冒落冲击振动规律相似试验研究[J].金属矿山,2020(8):49-54.
Mo Chao, Chen Xingming, Jia Da, et al. Similar experimental study on roof caving shock vibration rules in mining process[J]. Metal Mine,2020(8):49-54.

[14] 曹建立.多空区菱镁矿矿岩冒落规律及其应用研究[D].沈阳:东北大学,2017.
Cao Jianli. Study on the falling law and its application of magnesite orebody and rock with multi-mined-out areas[D]. Shenyang: Northeast University,2017.

[15] 吕涛,石永强,黄诚,等.非线性回归法求解爆破振动速度衰减公式参数[J].岩土力学,2007(9):1871-1878.
Lyu Tao, Shi Yongqiang, Huang Cheng, et al. Study on attenuation parameters of blasting vibration by nonlinear regression analysis[J]. Rock and Soil Mechanics,2007(9):1871-1878.

[16] 钟敏,谭宝会,张志贵,等.大面积胶结充填体下覆盖层安全高效形成方法研究[J].金属矿山,2021(6):108-114.
Zhong Min, Tan Baohui, Zhang Zhigui, et al. Study on safe and efficient overburden formation method under large area cementing backfill[J].Metal Mine,2021(6):108-114.

[17] 谭宝会.龙首矿西二区充填法转崩落法安全高效开采技术研究[D].沈阳:东北大学,2020.
Tan Baohui. Study on safe and high efficient mining technologies of transition from cementation filling to sublevel caving in the western No.2 mining area of Longshou Mine[D].Shenyang:Northeast University,2020.

[18] 李宏业,武拴军,王永定,等.微震监测技术在崩落法与充填法协同开采中的应用[J].矿业研究与开发,2024,44(6):228-233.
Li Hongye, Wu Shuanjun, Wang Yongding, et al. Application of microseismic monitoring technology in the collaborative mining process of caving method and backfilling mining method [J]. Mining Research and Development,2024,44(6):228-233.