

尾矿库下开采合理矿柱高度留设及 爆破动力分析

张有乾*

(中冶长天国际工程有限责任公司, 湖南 长沙 410007)

摘要:为保证尾矿库下安全回采,防止尾矿库水体通过采动裂隙进入采场对采场安全生产造成影响.本文对尾矿库下开采引起的“三带”高度进行分析计算,通过理论计算得出防水安全岩柱的厚度应大于 135.28 m.利用 HOEK-BROWN 非线性破坏准则获得岩体力学参数,在安全岩柱厚度为 135.28 m 条件下,通过数值模拟研究不同开采模式下“三带”高度和裂隙发育状态,采用普通采矿方法开采,导水裂隙带已发育到尾矿库底,对开采造成极大影响;采用充填采矿法后,导水裂隙带高度未发育至库底,处于较为安全的状态.并对尾矿库底构筑物进行爆破动力学分析,爆破震动后库底测点震动速度曲线出现双峰形态,最大震动速度为 1.139×10^{-6} cm/s,满足安全规程要求,爆破震动对尾矿库水工构筑物影响较小,不会造成破坏.

关键词:三下开采;导水裂隙带;充填开采

中图分类号:TD853

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2023)02-0015-08

Reasonable Pillar Height and Blasting Dynamic Analysis for Mining Under Tailings Pond

ZHANG Youqian

(Zhongye Changtian International Co., Ltd., Changsha 410007, China)

Abstract: In order to guarantee the safety of the mining operation under the tailing pond and prevent the water in the tailing pond from infiltrating to make adverse influence to the mining operation in mining stopes, the height of the Three Zone (TZ) is calculated. Through theoretical calculation, the thickness of waterproof safety rock pillar should be greater than 135.28 m. Rock mass mechanics parameters are obtained through HOEK-BROWN failure criterion. Under the condition of the safety thickness of rock pillar is 135.28 m, the “three zones” height and fracture state are studied by numerical simulation under different mining mode. With common mining methods, water-conductive fissure zone has been developed to reach the bottom of the tailings, leading to a great impact on mining. Using the filling mining method, the water-conducting fracture zone has not developed to the bottom of the reservoir and is in a relatively safe state. The blasting dynamics of the bottom structure of tailings pond is analyzed. The vibration velocity curve of the measuring point at the bottom of the tailings reservoir shows a double-peak shape, and the maximum vibration velocity is 1.139×10^{-6} cm/s, which meets the requirements of safety regulations. The blasting vibration has a very limited influence on the hydraulic structure of the tailings reservoir and will not cause damage.

Keywords: three-underground mining; water conducted fracture zone; back-fill mining

矿体开采后,当采场顶板应力强度超过岩体本身强度而发生破坏,破坏区域从下而上可分为冒落带,

裂隙带和弯曲下沉带,合成“三带”^[1].在“三带”中,冒落带和裂隙带中因发生塑性破坏或断裂破坏,形成贯通裂隙,成为导水通道,称为“导水裂隙带”.因导水裂隙带可将采场空间和地下水系通过贯通裂隙连通,甚至当裂隙发育带发育至地表时,会将地表水引入地下采掘空间,对生产安全造成极大影响^[2-5].

郭文兵等^[6]在总结国内三下开采的基础上认为“三下开采”核心技术为源头减沉控损开采和覆岩破坏控制,地下原位保护开采技术将是“三下开采”的发展趋势;杨家冕^[7]、王善飞^[8]、郭明明^[9]等学者分别针对不同矿山特定条件,采用数值模拟方式研究分析开采对地表的影响,优化传统“三下开采”范围计算方式,并认为充填采矿法可减少“三下开采”对地表的影响;孟凡明等^[10]采用 ANSYS 软件构建矿区三维模型,结合 FLAC^{3D} 模拟分析不同隔离层厚度条件下围岩稳定性特征及地表沉陷规律,并对矿块回采顺序进行优化;陈程^[11]通过搭建观测站进行现场观测,分析充填工作面回采后对地表沉陷的影响,得出采用膏体充填开采工艺,顶板未出现垮落,地面出现微小弹性变形,地表沉陷效果控制较好;宋子岭等^[12]分析“三下开采”中采用充填开采,充填率为 0, 80%, 85%, 90% 时地表变形移动规律,表明充填率大于 85% 时地表变形为 I 级损坏,充填开采效果较好.虽一些学者对“三下开采”做了一定的研究,但普遍缺少理论和模拟相结合的研究手段,且针对尾矿库下开采的研究鲜有出现.尾矿库下开采需综合考虑水体影响和相关构筑物的稳定性分析,尤其是爆破震动对尾矿库底构筑物的影响,因此本文以某多金属矿为研究对象,对开采引起的导水裂隙带高度及矿柱留设进行研究,并对尾矿坝底构筑物进行动力学分析,具有一定的研究意义.

1 工程概况

某多金属尾矿库下压覆部分矿体,随着矿山生产接近尾声,为提高矿山效益,提高矿石回收率,需对尾矿库下矿体开采安全进行可行性研究.矿山主要岩石力学参数见表 1,主要勘探线位置平面图见图 1.

表 1 岩石力学参数表

岩性	密度/ (kg/m ³)	单轴抗压 强度/MPa	单轴抗拉 强度/MPa	内聚力/ MPa	内摩擦 角/(°)	弹性模量/ 10 ⁴ MPa	泊松比	地质强度 指标(GSI)
英安玢岩	2 600	53.9	3.7	7.1	60.4	7	0.25	30
中细粒花岗岩	2 600	135.6	9.4	17.9	48.8	62	0.20	67

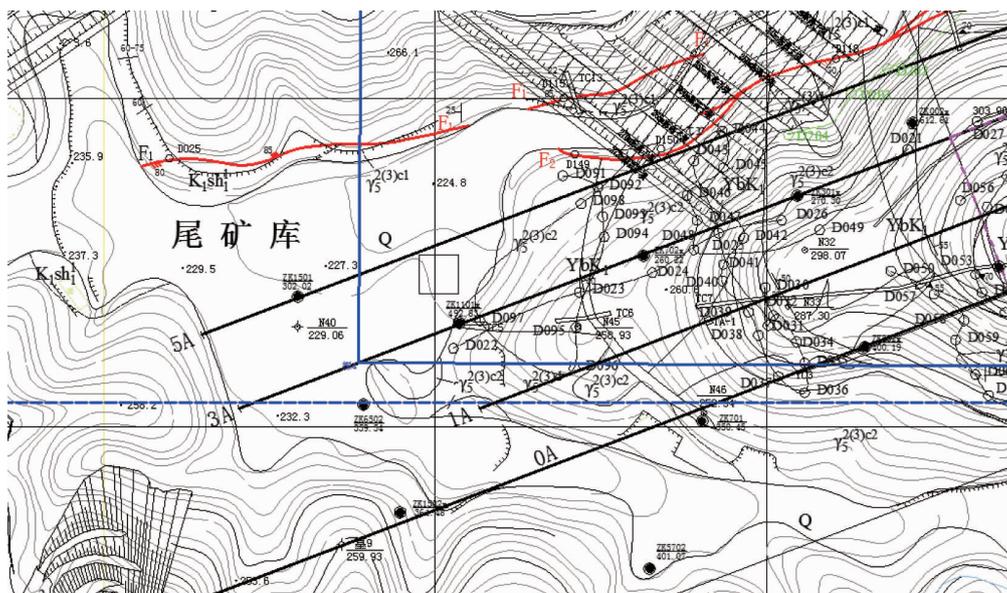


图 1 勘探线位置平面图

2 安全隔离层厚度计算

尾矿库下开采安全矿柱的留设需充分考虑开采引起的导水裂隙带高度和地表风化裂隙带发育程度,并同时考虑足够的保护层厚度.防水岩柱的高度 H_s 可由式(1)计算.

$$H_s \geq H_{li} + H_b + H_{fe}. \quad (1)$$

式中: H_{li} 为导水裂隙带高度, m; H_b 为保护层厚度, m; H_{fe} 为地表风化裂隙带厚度, m.

导水裂隙带高度 H_{li} 可由式(2)计算, 其中 $\sum M$ 为累计采厚, 本矿山累计采厚为 43.48 m.

$$H_{li} = \frac{100\sum M}{1.2\sum M + 2.0} \pm 8.9 = 80.26 \text{ m} \pm 8.9 \text{ m}. \quad (2)$$

保护层厚度 H_b 可由式(3)计算, 其中 A 为矿体平均厚度, 本矿山为 5.86 m.

$$H_b = 7A = 41.02 \text{ m}. \quad (3)$$

根据矿山地质勘查报告, 本矿山地表风化带高度一般为 10~14 m, 为保证矿山安全, 取上限即 14 m.

综上, 防水岩柱厚度为

$$H_s \geq H_{li} + H_b + H_{fe} = 135.28 \text{ m}. \quad (4)$$

3 安全岩柱留设数值模拟分析

3.1 岩体参数计算

根据 HOEK-BROWN 破坏准则^[13-14]

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^\alpha; \quad (5)$$

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{\text{GSI} - 100}{28 - 14D}\right); \quad (6)$$

$$s = \exp\left(\frac{\text{GSI} - 100}{9 - 3D}\right); \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-\text{GSI}/15} - e^{-20/3} \right). \quad (8)$$

式中: σ_1, σ_3 为第一、第三主应力, MPa; σ_c 为岩块单轴抗压强度, MPa, 中细粒花岗岩为 135.6 MPa, 英安玢岩为 53.9 MPa; m_b, s, α 为岩体材料常数; m_i 为完整岩石常数, 中细粒花岗岩为 32, 英安玢岩为 25; GSI 为地质强度指标, 中细粒花岗岩为 67, 英安玢岩为 30; D 为爆破影响系数, 取 1.

岩体抗压强度 σ_{cm} 可按式(9)计算:

$$\sigma_{cm} = \sigma_c \frac{[m_b + 4s - \alpha(m_b - 8s)] (m_b/4 + s)^{\alpha-1}}{28 - 14D}. \quad (9)$$

岩体内摩擦角 φ 和粘聚力 C 可按式(10)和式(11)计算:

$$\varphi = \sin^{-1} \left[\frac{6\alpha m_b (s + m_b \sigma_{3n})^{\alpha-1}}{2(1 + \alpha)(2 + \alpha) + 6\alpha m_b (s + m_b \sigma_{3n})^{\alpha-1}} \right]. \quad (10)$$

$$C = \frac{\sigma_c [(1 + 2\alpha)s + (1 - \alpha)m_b \sigma_{3n}] (s + m_b \sigma_{3n})^{\alpha-1}}{(1 + \alpha)(2 + \alpha) \sqrt{1 + [6\alpha m_b (s + m_b \sigma_{3n})^{\alpha-1}] / [(1 + \alpha)(2 + \alpha)]}}. \quad (11)$$

$$\frac{\sigma_{3\max}}{\sigma_{cm}} = 0.72 \left(\frac{100\sigma_{cm}}{\gamma H} \right)^{-0.91}. \quad (12)$$

$$\sigma_{3n} = \frac{\sigma_{3\max}}{\sigma_c}. \quad (13)$$

式中: σ_{3n} 为最大围压与岩块单轴抗压强度的比; $\sigma_{3\max}$ 为最大围压, MPa, 取 3.7 MPa; H 为岩体高度, m; γ 为岩块重度, kN/m^3 .

岩体变形模量 E_{mm} 可按式(14)计算:

$$E_{mm} = E_i \left[0.02 + \frac{1 - D/2}{1 + e^{[(60+15D-\text{GSI})/11]}} \right]. \quad (14)$$

式中: E_i 为未发生破坏岩体的变形模量, MPa.

代入表 1 中参数计算得到本次研究主要岩体力学参数如表 2 所示。

表 2 岩体力学参数表

岩性	内聚力/MPa	内摩擦角/(°)	变形模量/GPa
中细粒花岗岩	3.517	46.34	13.303
英安玢岩	0.446	21.50	1.160

3.2 数值模拟分析

采用 Midas GTS NX 软件进行数值模拟计算^[15-16]。根据勘探报告提供的地质剖面图,剖面线 5A,3A,1A,0 过尾矿库范围,其中 3A 剖面线可见尾矿库下赋存矿体且这条剖面线经过尾矿库中心位置,具有代表性。建立模型如图 2。

本次对勘探线 3A 剖面的矿体开采进行数值模拟,根据上文理论分析得到的最佳防水岩柱高度为 135.28 m,在留设 135.28 m 防水岩柱的条件下分 2 种情形分析:(1) 开采后不充填;(2) 采用充填法开采。

3.2.1 开采后不充填

随着尾矿库下矿体开采的进行,采场上的岩体发生破坏(塑性破坏或断裂破坏)的范围也会随之增加,导水裂隙带高度也会随之增大,随着开采的继续,甚至会发展到尾矿库底部。当裂隙发育带发育至尾矿库底部时,会将尾矿库内水体引入地下采掘空间,对生产安全造成极大影响。因此,将采场开采后,导水裂隙带的发育高度作为研究对象进行研究。导水裂隙带的主要特点是导水裂隙带内发生塑性破坏,因此可以通过数值模拟得到的塑性破坏区的范围判断导水裂隙带的发育高度。

对开采后不进行充填的情形进行数值模拟,得到围岩最大位移云图见图 3,围岩破坏范围及形式分布云图见图 4。

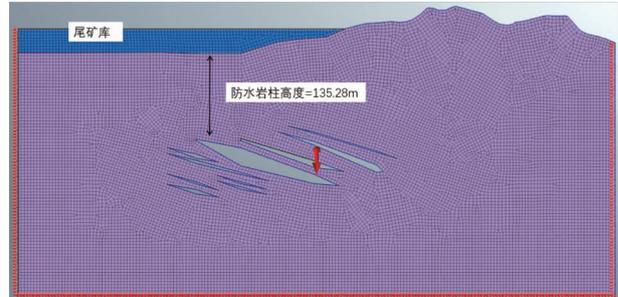


图 2 剖面 3 数值计算模型

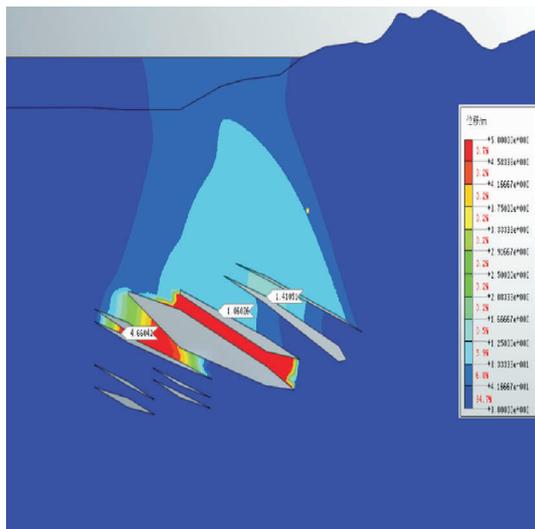


图 3 最大位移分布云图

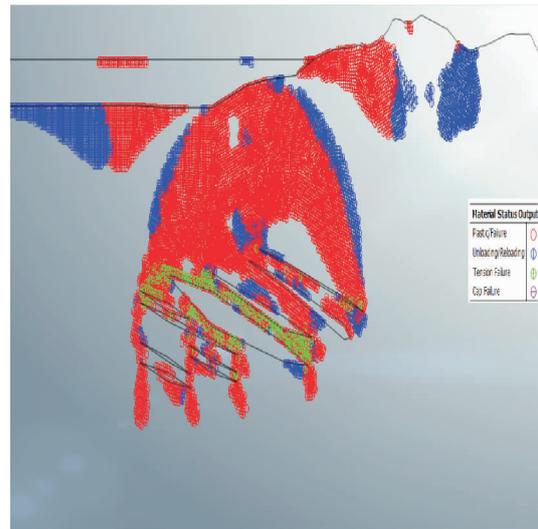


图 4 围岩破坏范围及形式分布云图

若开采后采场不进行充填,由图 3 可见,采场顶板最大变形超过 1.0 m,结合图 4 围岩破坏形式分别图可知,顶板已发生拉破坏且变形较大发生冒落。开采后顶板形成冒落拱形塑性区,根据图 4,塑性区已发育至尾矿库底位置,即导水裂隙带和尾矿库底相贯通,尾矿库的水和泥浆可能会通过导水裂隙进入采场造成涌水或涌砂,对采场安全生产构成巨大威胁。因此,采场开采后不充填无法保证采矿安全。

3.2.2 采用充填法开采

对开采后进行充填的情形进行数值模拟,得到围岩最大位移云图见图5,围岩破坏范围及形式分布云图见图6.

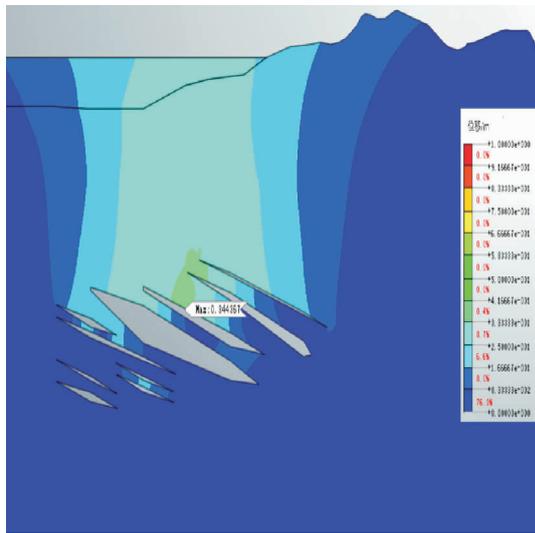


图5 最大位移云图

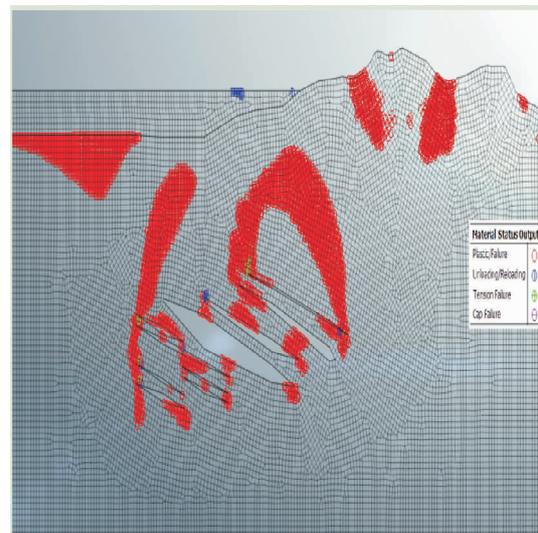


图6 围岩破坏范围及形式分布云图

采用充填采矿法后,由最大位移云图(图5)可知,采场最大变形出现在采场顶板,大部分采场最大变形均小于0.2 m,采场顶板处于整体稳定状态.导水裂隙带高度未发育到尾矿库底,可以保证井下开采过程中,尾矿库的水及砂不会通过导水裂隙带进入采场.

综上,根据上文安全隔离层厚度理论计算得到,保证尾矿库底安全开采需要留设防水岩柱135.28 m;在保留防水岩柱的情况下,分采后不充填和采后充填两种情形对采场稳定性进行数值分析,采后采场不充填可能会导致尾矿库水砂涌入采场,对采场造成安全隐患,而采用充填法可保证采场安全生产.

4 尾矿库下水工构筑物爆破动力学分析

4.1 特征值分析

特征值分析模型的边界条件采用弹性边界模型,MDS GTSNX 软件可通过曲面弹簧来构建弹性边界,建立如图7所示特征值分析模型进行特征值数值分析.

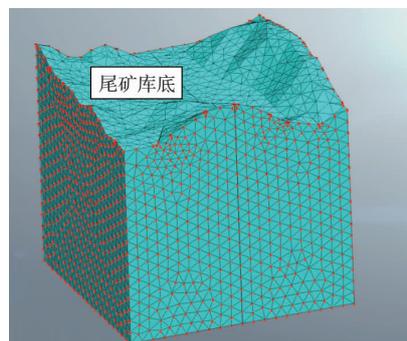


图7 特征值分析模型

特征值分析原理为对模型刚度矩阵和质量矩阵进行求解,利用 MDS GTSNX 软件特征值分析模组对模型进行求解,得到表3结果,其中特征值列为模型刚度矩阵和质量矩阵特征值,弧度、循环数用于分析模型频率,固有周期值为不同模数情况下研究对象的固有周期值,其中首行数据和次行数据,即是第1和第2模数下的研究对象的固有周期.第一固有周期为0.583 s,第二固有周期为0.516 s,模型固有周期作为结构自振特性对爆破同模型结构的作用有重要影响,该周期数值用于爆破动力分析中的输入参数.

表 3 特征值分析结果

模态	特征值	弧度	循环数	固有周期值/s
1	116.116	10.776	1.715	0.583
2	148.250	12.176	1.938	0.516
3	152.974	12.368	1.968	0.508
4	203.126	14.252	2.268	0.441
5	219.508	14.816	2.358	0.424
6	234.504	15.314	2.437	0.410
7	240.904	15.521	2.470	0.405
8	397.571	19.939	3.173	0.315
9	413.073	20.324	3.235	0.309
10	460.607	21.462	3.416	0.293

4.2 爆破动力分析

根据该矿山地质剖面图和地表模型图,建立 400 m×400 m×400 m 计算模型,见图 8.模型共划分 153 487 个单元.岩体破坏准则为摩尔-库仑.边界采用曲面弹簧单元模拟.

爆破震动产生的动压力 $P_D(t)$ 是随着时间变化的时程曲线,动压力公式采用 National Highway Institute 提出的公式,公式如式(15)^[17-18].

$$P_D(t) = 4P_B(\exp(\frac{-Bt}{\sqrt{2}}) - \exp(-\sqrt{2}Bt)). \quad (15)$$

式中: B 为荷载常量,取 16 338; P_B 为爆破震动作用在孔壁面上的压力,kPa. P_B 可通过式(16)计算.

$$P_B = P_{det} \left(\frac{d_c}{d_h} \right)^3; \quad (16)$$

$$P_{det} = \frac{4.50 \times 10^{-6} \times S_g \times V^2}{1 + 0.8S_g}. \quad (17)$$

式中: P_{det} 为爆破压力,kPa; d_c 为火药直径,mm; d_h 为孔眼直径,mm; S_g 为比重; V 为爆破速度,m/s.

矿山开采采用 2# 岩石乳化炸药,施工的炮孔直径为 42 mm,炸药药卷直径为 32 mm,单次爆破炸药量为 7.2 kg,炸药密度为 0.95~1.30 g/cm³,孔深为 2.25 m.得到爆破震动载荷时程曲线如图 9 所示.模拟得到爆破震动速度云图见图 10.

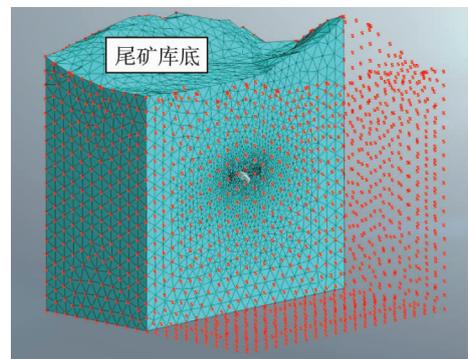


图 8 爆破动力分析模型

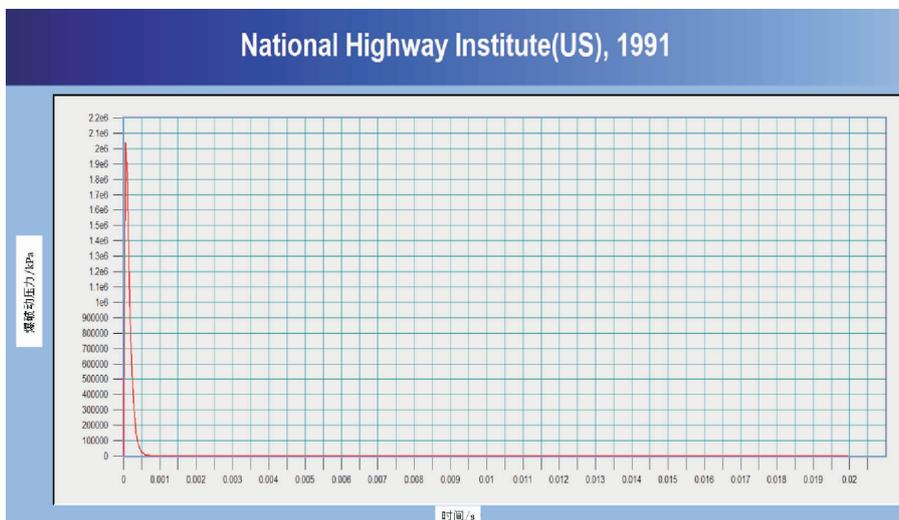


图 9 爆破震动载荷时程曲线

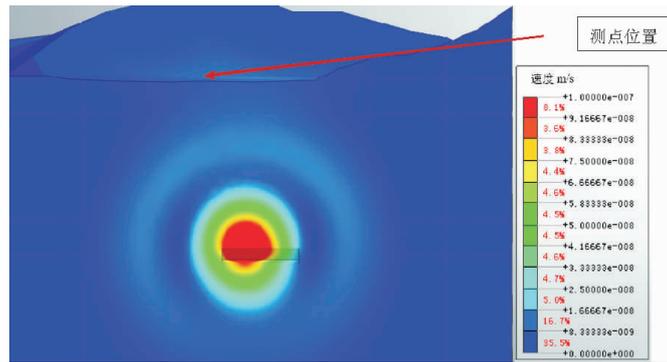


图 10 爆破震动速度云图(时间为 0.04 s)

布置测点于尾矿库排水斜槽附近,测点编号为 29896,对测点进行数值模拟动态监测,主要监测项目包括测点总位移、测点震动速度、测点震动加速度的监测,监测结果如图 11~图 13.

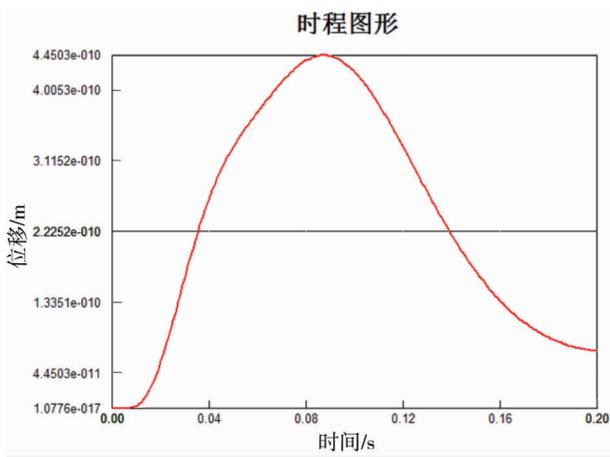


图 11 测点总位移时程曲线

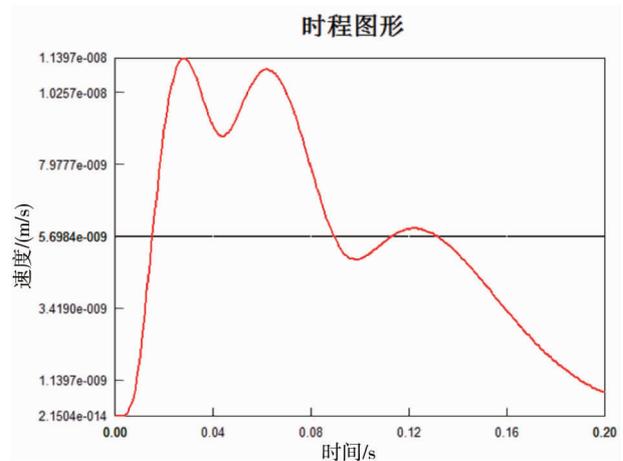


图 12 测点震动速度时程曲线

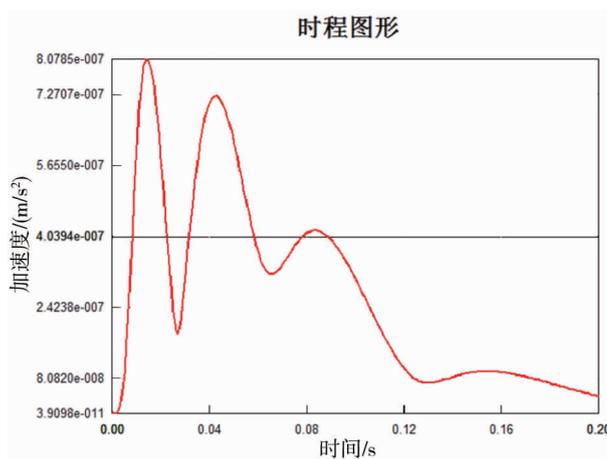


图 13 测点震动加速度时程曲线

根据图 11~图 13 可知:测点最大震动速度在地下爆破震动结束后呈现出先增加,高点出现双峰形态,后震动速度逐渐减小,最大震动速度为 $1.139\text{E}-6 \text{ cm/s}$ 。根据 GB6722—2014 爆破安全规程,当保护对象类别为水工隧洞等水工建筑物时,安全允许质点振动速度为 $8\sim 10 \text{ cm/s}$,测点最大振动速度小于规范要求最小值。综上,在保留隔离矿柱的条件下,井下爆破单次爆破炸药量控制在 7.2 kg 以下时,爆破振动对尾矿库水工建筑物的影响较小,不会造成破坏。

5 主要结论

1) 考虑导水裂隙带高度、保护层厚度、地表风化裂隙带厚度等因素得到保护岩柱的厚度至少为135.28 m.

2) 未采用充填采矿法的条件下,导水裂隙带高度已经发育到尾矿库底部,处于不安全状态.在保留135.28 m 保护岩柱的情况下,采用充填法,尾矿库的水和砂不会通过导水裂隙带进入采场,可保证采场安全生产.

3) 在保留隔离矿柱的条件下,井下爆破单次爆破炸药量控制在 7.2 kg 以下时,爆破振动对尾矿库水工建筑物的影响较小,不会造成破坏.

参考文献:

- [1] 钱鸣高,石平五.矿山压力与岩层控制[M].徐州:中国矿业大学出版社,2003.
- [2] 黄万朋,高延法,王波,等.覆岩组合结构下导水裂隙带演化规律与发育高度分析[J].采矿与安全工程学报,2017,34(2):330-335.
- [3] 陈连军,李天斌,王刚,等.水下采煤覆岩裂隙扩展判断方法及其应用[J].煤炭学报,2014,39(S2):301-307.
- [4] 高保彬,刘云鹏,潘家宇,等.水体下采煤中导水裂隙带高度的探测与分析[J].岩石力学与工程学报,2014,33(S1):3384-3390.
- [5] 黄俊,王卫军,王林,等.急倾斜煤层充填开采的数值模拟[J].矿业工程研究,2010,25(3):16-19.
- [6] 郭文兵,马志宝,白二虎.我国煤矿“三下一上”采煤技术现状与展望[J].煤炭科学技术,2020,48(9):16-26.
- [7] 杨家冕,李鹏程.铜陵金口岭铜矿“三下”开采地表变形研究[J].现代矿业,2021,37(6):192-194.
- [8] 王善飞,王康,马凤山,等.三山岛金矿“三下”开采工艺优化与灾害防治[J].黄金科学技术,2020,28(5):734-742.
- [9] 郭明明,李洁慧,李华华,等.盘龙铅锌矿“三下”开采安全影响分析[J].有色金属工程,2020,10(8):107-112.
- [10] 孟凡明,匡鑫,王祯,等.马郡城铁矿“三下”开采隔离层厚度及回采顺序研究[J].金属矿山,2022(8):20-26.
- [11] 陈程.麻家梁矿四采区膏体充填开采系统设计研究与应用[J].煤,2022,31(3):56-57.
- [12] 宋子岭,陈明进.冒溪煤矿建筑物下急倾斜煤层充填开采地表变形预测[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2021,40(6):486-495.
- [13] 高悦,段连强,刘风华,等.广义 Hoek-Brown 岩体强度准则的 m, s 参数改进研究[J].化工矿物与加工,2018,47(11):29-33.
- [14] 李华舟,胡斌,柯竹兰,等.基于 Hoek-Brown 准则的岩体力学参数优化[J].低温建筑技术,2016,38(10):94-96.
- [15] 叶志程,杨溢,左晓欢,等.基于 Midas-GTS/NX 的不同工况下某边坡稳定性分析及加固措施[J].化工矿物与加工,2021,50(5):16-19.
- [16] 刘妍妍,云斌.Midas/GTS 在边坡稳定计算中的应用[J].内蒙古水利,2021(4):73-74.
- [17] STARFIELD A M, PUGLIESE J M. Compression waves generated in rock by cylindrical explosive charges: a comparison between a computer model and field measurements [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1968, 5(1):65-77.
- [18] 向文飞,舒大强,朱传云.起爆方式对条形药包爆炸应力场的影响分析[J].岩石力学与工程学报,2005,24(9):1624-1628.