

滨海基岩矿床开采防水矿岩柱高度的确定

吴 浩, 赵国彦, 马少维, 曹文卓, 姜海涛
(中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要:三山岛金矿新立矿区是国内首家海下开采的金属矿山, 为确保海下开采安全和减小矿产资源损失, 科学、合理地确定防水矿岩柱尺寸在工程实践中显得尤为重要。根据矿山开采条件, 首先, 引入等效厚度系数 n 对采场导水裂隙带高度经验公式进行修正, 由此计算防水矿柱的最小高度为 $(48.1 \pm 5.6) \text{m}$ 。其次, 运用力学解析法从强度和刚度两个方面对 2 种力学模型下的防水矿柱尺寸进行分析与计算。基于强度条件, 拟合出防水矿柱高度与安全系数的回归曲线; 基于变形条件, 采用积分变形法计算防水矿柱的临界高度分别为 37.24m 和 40.40m。最后, 采用 Flac^{3D} 数值模拟方法得出 -200m 中段采场导水裂隙带高度为 34.75m。综合以上结果, 最终确定新立矿区防水矿岩柱的高度为 54m。

关键词: 防水矿柱; 滨海基岩矿床; 海下开采; 导水裂隙带; 突水

文章编号: 1003-8035(2014)01-0044-07

中图分类号: TD857

文献标识码: A

0 引言

海洋是矿产资源的聚宝盆, 目前在海底下已发现的矿床有铜、铁、金、锰等 20 多种^[1]。滨海基岩矿床赋存在离海岸线较近的大陆架中, 上覆海水深度浅, 具备开发利用的各项条件。开采该类矿床不会造成地表沉陷、水系破坏和环境污染, 不受隐伏老空区的干扰, 不需支付搬迁和征地赔偿等费用。可见, 滨海基岩矿床将是矿业今后开采的重点。

迄今为止, 国内外开展滨海基岩矿床开采的矿山共有 7 个, 分别为: 澳大利亚 Dove 钨矿、加拿大 Conception Bay 铁矿和 Newfoundland 铁矿、英国 Levent 锡矿、芬兰 Jaya Salo Croix 铁矿、法国 Normandy 铁矿以及我国三山岛金矿, 它们利用岸边井筒结合长石门的开拓方法进行海下矿体的回采^[2-3]。由于海水不易疏干或疏降处理, 在海水等水体下采矿的通常做法是留设一定高度的防水矿岩柱, 其实质是防止采场采动引起的导水裂隙带波及上覆水体, 避免突水事故的发生。防水矿岩柱尺寸如果留设过大, 则造成资源浪费和效益亏损; 若留设过小, 则不能保证海下开采的安全。合理设计防水矿岩柱尺寸的关键是准确确定采场导水裂隙带高度 (简称“导高”), 目前确定导高的方法有经验公式法、数值模拟方法、相似材料模拟和现场实测法 4 类。邓雪杰等^[4]、孙景武等^[5]、李家卓等^[6] 分别用经验公式法结合 RFPA、3DEC、Flac^{3D} 等数值软件确定了采场导高, 结果与实测值基本吻合。刘新河等^[7] 采用相似材料模拟试验对岳成水库下申家庄矿 2 号矿体采场覆岩

运动规律进行研究, 发现采场导高远远小于覆岩厚度, 最后给出了该水库下采矿是安全可行的结论。施龙青等^[8] 采用钻孔封堵测漏法测得微山湖下殷庄矿 8108 采场导高为 39m, 由此将防水矿岩柱高度缩小 45m, 成功解放了大量矿柱资源。孙亚军等^[9] 综合运用钻孔电视成像、网络并行电法等方法对小浪底水库下新安矿采场导高进行观测, 为合理确定矿山开采上限提供了参考依据。

三山岛金矿新立矿区在设计时无经验可循, 为了保证海下开采安全, 矿山在海底留了约 130m 高的防水矿柱。实践表明, 该部分矿柱尺寸过大, 压占了大量资源, 有必要对其进行重新确定。鉴于此, 本文针对新立矿区海下开采开展了防水矿岩柱高度的研究, 通过经验公式法、力学解析法和数值模拟综合确定了防水矿岩柱高度, 为实现海下安全高效开采奠定了基础。

1 工程背景

1.1 矿区地质概况

三山岛金矿新立矿区位于莱州湾畔, 北西两面濒临渤海, 东与直属矿区隔王河相望, 矿区全被海水和

收稿日期: 2013-06-06; **修订日期:** 2013-08-13

基金项目: 中南大学中央高校基本科研业务费专项资金资助 (2013zzts260); 国家重点基础研究发展规划 (“973” 计划) 项目 (2010CB732004)

作者简介: 吴 浩 (1990—), 男, 安徽淮北人, 硕士, 从事矿山“三下” 开采等方面的研究工作。

E-mail: austesu0711@163.com

第四系覆盖。目前矿山只开采 -165m 中段以下矿体(图 1)。矿区矿床位于三山岛-仓上控矿断裂带的东北部,为接触热液蚀变成矿,主采矿体赋存于蚀变带主裂面下 0~35m 范围内。矿体总体走向 62°,倾向南东,平均倾角 46°,平均厚度 25m。矿区水文地质条件比较复杂,第四系上部为地表浅层、海泥层和砂砾层组成的与海水水力联系密切的强富水层,是矿井的主要威胁水源。第四系底部有连续分布的由砂质粘土、粉质粘土组成的厚度为 0.8~10.0m 的隔水层,它将第四系含水层与基岩含水带隔离开使其不产生水力联系,对海下开采极为有利。此外,基岩风化带、上盘含水带和下盘含水带虽能造成矿井充水,但其渗透系数和单位涌水量均较小,对矿山安全生产不构成威胁^[10]。

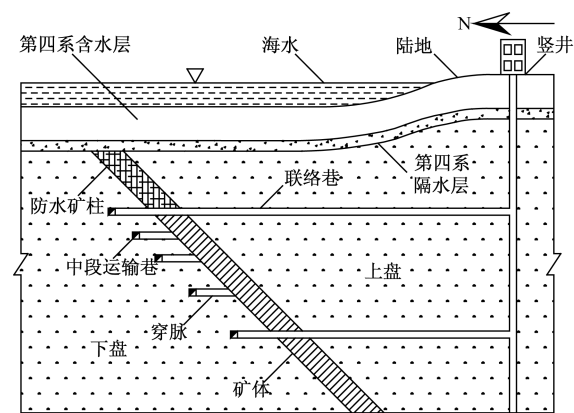


图 1 三山岛金矿海下开采示意图
Fig. 1 Mining sketch undersea of Sanshandao Gold mine

1.2 矿岩物理力学参数

矿区矿体由黄铁绢英岩化碎裂岩组成,上、下盘

岩性分别为黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩和黄铁绢英岩化花岗岩,采场胶结充填体灰砂比为 1:16。经现场勘查,在矿山不同开采区域选取有代表性的岩样进行加工,采用英国 INSTRON 公司生产的电液伺服材料控制机对试件进行测试分析,主要包括试件物理参数测定、抗压试验、抗拉试验、剪切试验以及充填体强度试验等。根据测试结果,采用折减系数法计算岩体工程物理力学参数(表 1)。

1.3 矿区地应力分布规律

根据前期开展的研究^[11],在矿区工程地质调查的基础上,结合现场施工条件,在 -165m, -240m 和 -400m 三个中段选择 6 个测点采用应力解除法进行地应力测试,通过对测量点进行最小二乘法拟合,得出了应力和采深的相关关系:

$$\sigma_{hmax} = 0.0539H + 0.11 \tag{1}$$
$$\sigma_{hmin} = 0.0181H + 0.13 \tag{2}$$
$$\sigma_z = 0.0315H + 0.08 \tag{3}$$

式中: H ——采深(m);
 σ_{hmax} ——最大水平主应力(MPa),方向和矿体走向近似垂直;
 σ_{hmin} ——最小水平主应力(MPa),方向和矿体走向近似平行;
 σ_z ——垂直主应力(MPa)。

现场地应力的测试结果表明,矿区地应力以水平构造应力为主,最大主应力方向平均为 N32.43°W,与控矿断裂带走向夹角为 75°左右,对控矿断裂带产生强烈的左行压扭作用,断裂带导水性因此受到抑制,这也是矿区控矿断裂带充水性较弱的主要原因。

表 1 矿岩物理力学参数

Table 1 Physical-mechanical parameters of ore body and rock							
矿岩类型	密度 (g·cm ⁻³)	弹性 模量(GPa)	泊松比	内摩擦角(°)	内聚力 (MPa)	抗压强度 (MPa)	抗拉强度 (MPa)
下盘	2.64	5.30	0.24	35.0	0.88	28.83	1.06
矿体	2.71	3.48	0.19	32.0	0.50	22.64	0.60
上盘	2.68	4.03	0.20	32.2	0.26	21.38	0.30
充填体	2.10	0.23	0.19	38.7	171.00	1.17	0.17

2 防水矿岩柱高度的修正公式法预计

海下开采防水矿岩柱高度是否合理,决定着海下开采是否安全以及能否实现资源回收率和矿山效益的最大化。防水矿岩柱高度 $H_{\text{水}}$ 计算公式为:

$$H_{\text{水}} = H_{\text{导}} + H_{\text{保}} \tag{4}$$

式中: $H_{\text{导}}$ ——采场导高(m);
 $H_{\text{保}}$ ——保护层厚度(m)。

保护层的作用一是在水体与导水裂隙带之间起隔水作用,二是弥补因勘探程度不足等原因造成防水矿岩柱高度偏小的缺陷,从而保证水下开采的安全。我国在水体下采煤开展了大量的研究和实践,积累了

可靠的计算导高的经验公式。金属矿山多采用充填采矿法控制围岩的移动和变形,和垮落采矿法相比,采场导高受到抑制明显变小。根据矿山开采条件,借鉴文献[12]中导高经验公式,引入厚度等效系数 η ,将导高公式修正为:

$$H_{\text{导}} = \frac{100\eta m}{1.6\eta m + 3.6} \pm 5.6 \quad (5)$$

式中: m ——矿体采厚(m);

η ——充填未接顶接系数和沉降压缩系数之和,对于胶结和尾砂充填,取 0.1 ~ 0.3。

矿体厚度 m 为 25m, η 取 0.2。

根据经验值^[13],保护层厚度取 5m,由式(4)、(5)计算新立矿区海下开采需留设防水矿岩柱的高度至少为(48.1 ± 5.6)m。

3 防水矿岩柱尺寸的力学分析与计算

3.1 强度条件下的力学分析与计算

海下开采留设一定高度的防水矿柱,其走向长度远大于横截面尺寸,因而可以将防水矿柱岩梁看成杆件结构,运用材料力学从强度和刚度两个方面对其进行力学分析和计算。假定矿柱岩梁符合均质、连续和各向同性假设,杆件断面形状近似为矩形,矩形断面的长和宽对应防水矿柱的厚度和高度。开采首个盘区,盘区跨度小于岩梁极限跨距,顶板岩梁未发生初次断裂时,防水矿柱近似为两端嵌固梁结构,力学模型如图 2:

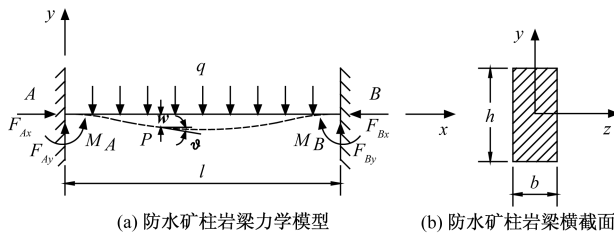


图 2 防水矿柱嵌固梁力学模型

Fig. 2 Embedded beam mechanical model of waterproof pillar

图 2 中, q 载荷由单位厚度矿柱上的垂直应力和自重组成,MPa; F_{Ax} 、 F_{Bx} 和 F_{Ay} 、 F_{By} 分别为 A、B 点受的水平分力和竖直分力,N; M_A 、 M_B 为弯矩,N·m; l 为杆件长度即盘区跨度,m; b 、 h 为杆件横截面的长和宽,m; w 、 ϑ 为杆上 P 点的挠度和转角,m、rad。显然,上述力学结构为 3 次超静定结构,A、B 两点处的水平位移和转角都为 0,根据变形叠加法,结合静力学平衡方程:

$$\begin{cases} \sum F_x = F_{Ax} - F_{Bx} = 0 \\ \sum F_y = F_{Ay} + F_{By} - ql = 0 \\ \vartheta_B = \vartheta_B(M_B) + \vartheta_B(F_{By}) - \vartheta_B(q) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中, $\vartheta_B(M_B)$ 、 $\vartheta_B(F_{By})$ 、 $\vartheta_B(q)$ 分别代表 M_B 、 F_{By} 和 q 作用下 B 点产生的转角。根据对称性计算得, $F_{Ax} = F_{Bx} = 0$, $F_{Ay} = F_{By} = \frac{ql}{2}$, $M_A = M_B = \frac{ql^2}{12}$ 。由杆件的弯矩函数得出,杆件两端处弯矩最大,显然,杆件两端上边缘最容易产生受拉破坏,根据强度条件:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max} y_{\max}}{\int y^2 dy dz} \leq \frac{\sigma_{\text{拉}}}{n} \quad (7)$$

式中: $M_{\max}$ ——杆承受的最大弯矩(N·m);

y ——杆横截面上点到中性轴 z 轴的距离(m);

n ——安全系数;

$\sigma_{\text{拉}}$ ——矿体抗拉强度(MPa);

q ——含 h 高度在内的 σ_z (MPa)。

l 为 80m, b 为 25m,将数值代入式(7)得到不同安全系数下的防水矿岩柱高度,二者拟合曲线如图 3。

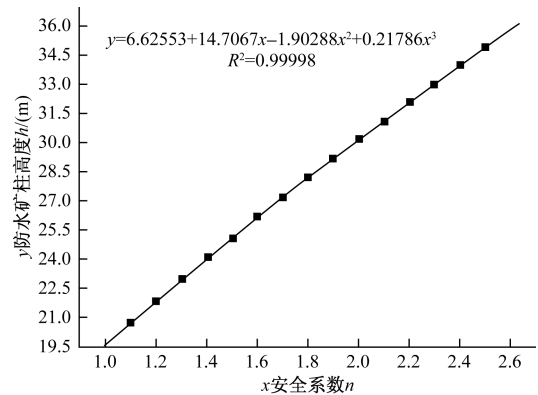


图 3 嵌固梁模型不同安全系数下防水矿岩柱高度

Fig. 3 The height of waterproof pillar under different safety factor of embedded beam mechanical model

随着盘区开采的接替,岩梁跨距逐渐增大,达到极限跨距后,采场顶板岩梁出现断裂,断裂处位于盘区间柱内。此时,盘区防水矿柱岩梁力学模型转变为—端嵌固—端简支的结构(图 4):

显然,图 4 中力学模型为 2 次超静定结构,B 点挠度和水平位移均为 0,根据 B 点挠度的变形协调关系式:

$$w_B = w_B(F_{By}) - w_B(q) = 0 \quad (8)$$

式中: $w_B(F_{By})$ 、 $w_B(q)$ ——代表 F_{By} 和 q 作用下 B 点产生的挠度。

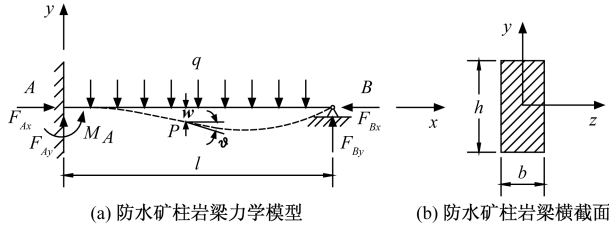


图 4 防水矿柱嵌固-简支梁力学模型

Fig. 4 Embedded-supported beam mechanical model of waterproof pillar

同样,结合静力学平衡方程得: $F_{Ax} = F_{Bx} = 0$, $F_{Ay} = \frac{5ql}{8}$, $F_{By} = \frac{3ql}{8}$, $M_A = \frac{ql^2}{8}$ 。由杆件的弯矩函数得出,杆件 A 处弯矩最大,该处杆件上边缘最容易产生受拉破坏,同样,根据式(7)求得不同安全系数下的防水矿柱高度,二者的回归曲线如图 5。

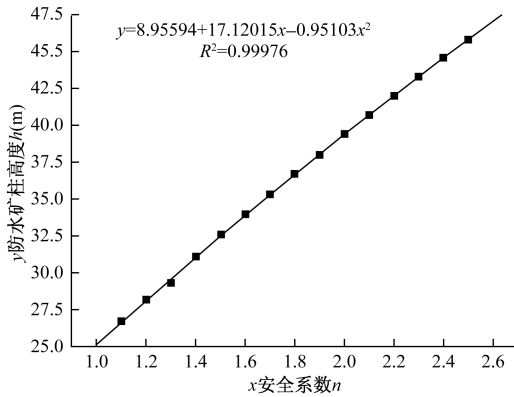


图 5 嵌固-简支梁模型不同安全系数下防水矿柱高度

Fig. 5 The height of waterproof pillar under different safety factor of embedded-supported beam mechanical model

3.2 刚度条件下的力学分析与计算

国内外一些学者认为,海下开采是否安全还和海底岩层水平拉伸变形大小有关,如英国规定海下开采海底岩层水平变形量要小于 10mm/m,澳大利亚规定海底岩层水平拉伸变形量不允许超过 7.5 mm/m,我国认为水下岩层产生的拉伸变形量应小于 2~3mm/m^[14-16]。到目前为止,国内外关于该标准值还未统一,这可能和各国国情、矿床地质及开采技术条件不同有关。可见,在载荷作用下,矿柱岩梁除具有足够的强度外,还应有一定的抵抗变形的能力。在图 2、图 4 力学模型中,虚线为杆件变形后的状态,变形后杆长为 l' 。根据杆件固定端转角和挠度均为 0 以及简支端挠度为 0 的条件,由材料力学公式(9),可计算出 2 种模型中杆件的挠度函数 $w_1(x)$ 、 $w_2(x)$:

$$\frac{d^2 w}{dx^2} = \frac{M}{E \iint y^2 dy dz} \quad (9)$$

$$\begin{cases} w_1(x) = \frac{-qx^4 + 2qlx^3 - ql^2x^2}{2Ebh^3} \\ w_2(x) = \frac{-2qx^4 + 5qlx^3 - 3ql^2x^2}{4Ebh^3} \end{cases} \quad (10)$$

式中: w ——杆件上横坐标为 x 点处的挠度(m);

M ——其弯矩(N·m); E 为弹性模量(GPa)。

显然,挠度函数 $w_1(x)$ 、 $w_2(x)$ 在区间 $[0, l]$ 上连续且可导,那么,计算 2 种力学模型下杆件水平拉伸变形量 ξ_1 、 ξ_2 的积分变形法公式为:

$$\begin{cases} \xi_1 = \frac{\int_0^l \sqrt{1 + w_1'(x)^2} dx - l}{l} \\ \xi_2 = \frac{\int_0^l \sqrt{1 + w_2'(x)^2} dx - l}{l} \end{cases} \quad (11)$$

水平拉伸变形量 ξ_1 、 ξ_2 的临界值取 2mm/m,将数值代入式(10)、(11),用 Matlab 软件计算出 2 种模型下防水矿柱岩梁的最小高度分别为 37.24m 和 40.40m。

4 导水裂隙带高度的数值模拟分析

4.1 Flac^{3D}耦合 Midas/GTS 建模技术

Flac^{3D} 是一款对岩石等材料三维结构受力特性模拟和塑性流动分析的有限差分软件,能较好地模拟材料的屈服、塑性流动、软化以及大变形等力学行为。它采用命令输入式的坐标点法建立几何模型,在构建复杂模型时往往比较困难。Midas/GTS 是针对岩土结构进行研究的一款有限元分析软件,它具有强大的前处理功能。因此,笔者采用 Midas/GTS 耦合 Flac^{3D} 技术对采场导高进行模拟分析。首先,利用 Midas/GTS 软件进行几何建模和网格划分;然后,提取网格模型的节点和单元,通过数据转换程序生成 Flac^{3D} 所需的格式;最后,利用 Import Grid 命令将转换后的模型导入 Flac^{3D} 中进行数值运算和后处理分析。

4.2 计算模型的建立

目前矿区已开拓的中段有 -165m、-200m、-240m、-320m 和 -400m,矿山采矿方法为盘区机械化房柱上向分层充填法,矿房和矿柱垂直墙体走向间隔布置。根据矿山开采条件,以 -200m 中段某盘区

作为模拟对象,该盘区长 80m,宽为 25m,高 35m,盘区沿矿体走向分为 4 个等长的矿房和矿柱,矿房、矿柱交替开采。考虑 3~5 倍的开挖影响范围,模型尺寸为 480m×375m×300m(长×宽×高),由 246941 个单元和 46093 个节点组成(图 6)。

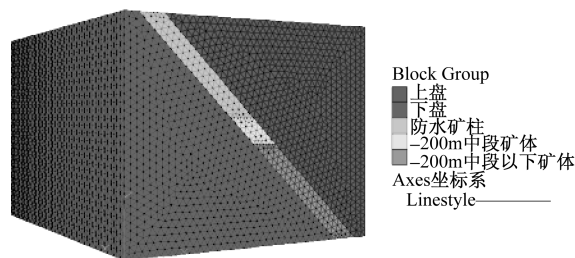
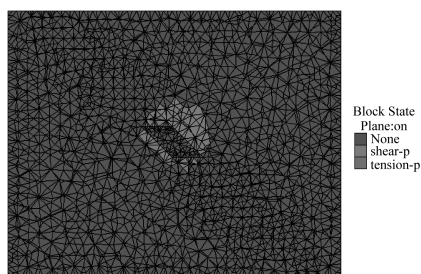


图 6 计算模型图

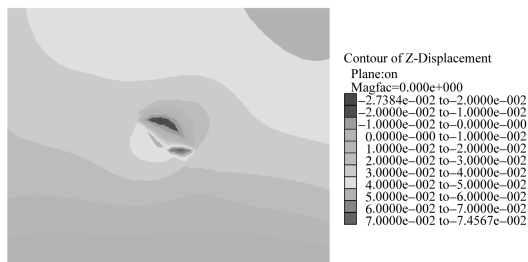
Fig. 6 Calculation model

4.3 模拟结果分析

根据矿区地应力分布规律和矿岩物理力学参数,在采场开挖之前对模型赋予初始地应力场。开采盘区时,先采矿房,后采矿柱,采后进行充填。开采矿房时,矿房两侧为矿柱;开采矿柱时,矿柱两侧为矿房充填体。目前,数值模拟中通常采用塑性区和开挖引起的位移变化范围作为导水裂隙带范围的判据^[9]。因此,本次模拟研究盘区采场在采后充填情况下导水裂隙带的最大发育高度,模拟结果如图 7。



(a) 采场塑性区范围



(b) 开挖引起的竖向位移云图

图 7 采场塑性区范围及竖向位移云图

Fig. 7 Plastic area and vertical displacement contours of stope

由图 7 可知,开挖引起的塑性区范围和位移变化

范围基本相当,根据相似比例法计算采场充填后导水裂隙带发育高度为 34.75m,与修正经验公式法的预计值基本吻合。采场靠近上盘上隅角沉降位移最大,为 2.74cm;采场底板产生底鼓,底鼓量最大为 7cm,与矿山采用多点位移计监测得到的位移变化规律基本一致^[17-18]。

5 结论

通过对三山岛金矿新立矿区防水矿岩柱的力学计算分析和采场导高的经验公式预计、数值模拟研究,得出以下结论:

(1) 借鉴煤矿水下开采导高经验公式,根据矿山开采条件,引入等效厚度系数 n 对采场导高经验公式进行修正,根据修正公式计算矿山需留设防水矿岩柱的最小高度为 (48.1 ± 5.6) m。

(2) 运用材料力学从强度和刚度两个方面对 2 种力学模型下的防水矿柱进行力学分析与计算。根据强度条件,拟合出了 2 种力学模型下安全系数与防水矿柱高度的回归曲线;根据变形条件,采用积分变异性法计算 2 种力学模型下防水矿岩柱的最小高度分别为 37.24m 和 40.40m。

(3) 为了准确确定防水矿岩柱尺寸,采用 Flac^{3D} 耦合 Midas/GTS 建模技术模拟 -200m 中段采场充填后的导高为 34.75m。综合以上研究结果,考虑一定的安全系数,最终确定新立矿区防水矿岩柱的高度为 54m。

(4) 需要指出的是,与海水联系密切的松散含水层具有一定的水压,它会对第四系底部隔水层产生渗透破坏并形成渗透带,渗透带高度是确定防水矿岩柱尺寸不可忽略的重要影响因素,它是今后工作需要进一步研究的方向。

参考文献:

- [1] 王振荣, 兰江华, 王菲菲. 中国海洋国土的确定及矿产资源[J]. 矿物岩石, 2010, 30(3): 1-14.
WANG Zhenrong, LAN Jianghua, WANG Feifei. Regional tectonics and mineral resources of marine territory in China [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2010, 30(3): 1-14.
- [2] PENG Kang, LI Xibing, WAN Chuanchuan, et al. Safe mining technology of undersea metal mine [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(3): 740-746.

- [3] 赵国彦. 海基硬岩矿床的安全开采技术研究[J]. 中国安全科学学报, 2009, 19(5): 159-166.
ZHAO Guoyan. Study on the safety mining technology of seabed hard rock [J]. China Safety Science Journal, 2009, 19(5): 159-166.
- [4] 邓雪杰, 谭辅清, 房萧. 五沟煤矿第四含水层下合理回采上限分析[J]. 煤炭工程, 2012(4): 79-84.
DENG Xuejie, TAN Fuqing, FANG Xiao. Analysis on rational up-limit of mining under No. 4 aquifer in Wugou Mine[J]. Coal Engineering, 2012(4): 79-84.
- [5] 孙景武, 刘家根, 韩德明, 等. 极弱胶结覆岩综放开采导水裂隙带发育高度预测研究[J]. 矿山测量, 2012(2): 19-21.
SUN Jingwu, LIU Jiagen, HAN Deming, et al. Study on predicting the height of water flowing fractured by caving of quite weak cementation of overlying strata[J]. Mine Survey, 2012(2): 19-21.
- [6] 李家卓, 方庆河, 谭文峰, 等. 覆岩裂隙带发育高度数值模拟与探测[J]. 金属矿山, 2011(6): 42-45.
LI Jiazhao, FANG Qinghe, TAN Wenfeng, et al. Numerical simulation and detection study on the height of water flowing fractured zone in overburden strata[J]. Metal Mine, 2011(6): 42-45.
- [7] 刘新河, 段文堂, 杨本生. 水下矿床开采的相似模拟研究[J]. 黄金, 2001, 22(5): 18-20.
LIU Xinhe, DUAN Wentang, YANG Bensheng. Similar simulation study of mining ore-deposit under water-body [J]. Gold, 2001, 22(5): 18-20.
- [8] 施龙青, 辛恒奇, 翟培合, 等. 大采深条件下导水裂隙带高度计算研究[J]. 中国矿业大学学报, 2012, 41(1): 37-41.
SHI Longqing, XIN Hengqi, ZHAI Peihe, et al. Calculating the height of water flowing fracture zone in deep mining[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2012, 41(1): 37-41.
- [9] 孙亚军, 徐智敏, 董青红. 小浪底水库下采煤导水裂隙发育监测与模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2): 238-245.
SUN Yajun, XU Zhimin, DONG Qinghong. Monitoring and simulation research on development of water flowing fractures for coal mining under Xiaolangdi reservoir[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 238-245.
- [10] 张磊, 张延凯. 三山岛金矿新立矿区上覆岩层赋存状况探查与分析报告[R]. 北京: 北京科技大学, 2009: 3-8.
ZHANG Lei, ZHANG Yankai. The exploration and analysis report on overburden occurrence position in Xinli District of Sanshandao Gold Mine [R]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2009. (In Chinese)
- [11] 李夕兵, 刘志祥, 彭康, 等. 金属矿滨海基岩开采岩石力学理论与实践[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(10): 1945-1953.
LI Xibing, LIU Zhixiang, PENG Kang, et al. Theory and practice of rock mechanics related to the exploitation of undersea metal mine [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(10): 1945-1953.
- [12] 国家煤炭工业局. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程[S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2004: 229-230.
National Coal Industry Bureau. Coal pillar's designing and mining regulations of buildings, water, railway and main roadway [S]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2004.
- [13] 桂和荣. 防水煤(岩)柱合理留设的应力分析计算法[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1997: 50-62.
GUI Herong. Stress analysis and calculation method of waterproof coal (rock) pillars designed [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1997.
- [14] Batchelor DH, Wardle H. Sealing of undersea breach into Levent Tin Mine, Cornwall [J]. Mining Engineering, 1969(107): 661-676.
- [15] Sacranone A, Desai M. Real-time detection of undersea mines: A complete screening and acoustic fusion processing system [J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 1999, 3710(1): 615-625.
- [16] 邹友峰, 邓喀中, 马伟民. 矿山开采沉陷工程[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003: 129-134.
ZOU Youfeng, DENG Kazhong, MA Weimin. Mining subsidence engineering[M]. Xuzhou: China University of Science and Technology Press, 2003: 129-134.
- [17] 彭康, 李夕兵, 彭述权, 等. 海底下框架式分层充填法开采中矿岩稳定性分析[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2011, 42(11): 3452-3458.
PENG Kang, LI Xibing, PENG Shuquan, et al. Ore-rock stability of frame stope hierarchical level filling mining method in seabed mining [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2011, 42(11): 3452-3458.
- [18] 赵国彦, 刘立顺, 栗红玉, 等. 采场岩移规律现场监

测试验及时间序列预报[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(6): 2300-2307.
ZHAO Guoyan, LIU Lishun, LI Hongyu, et al. Safety

monitoring test and time series predicting analysis for roof support[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2012, 43(6): 2300-2307.

Design on the size of waterproof pillar(rock) in subsea bedrock mining

WU Hao, ZHAO Guo-yan, MA Shao-wei, CAO Wen-zhuo, JIANG Hai-tao

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Xinli district of Sanshandao Gold Mine is the first metal mine undersea in China. To ensure safety of mining undersea and reduce the loss of mineral resources, it's crucial to design the size of waterproof pillar(rock) scientifically and reasonably in engineering practice. According to the mining conditions, firstly, the paper introduces the equivalent thickness coefficient n to amend the empirical formula of stope's water flowing fractured zone, by which, the minimum height of the waterproof pillar calculated is (48.1 ± 5.6) m. Secondly, the paper analyzes and calculates the size of waterproof pillar in two mechanical models of waterproof pillar from the aspects of both strength and stiffness. The regression curve that between the height of waterproof pillar and safety factor is fitted in condition of strength. Then, the critical height of waterproof pillar is 37.24m and 40.40m respectively, calculated by integral degeneration in condition of strength. Finally, the water flowing fractured zone of-200m stope measured by Flac^{3D} numerical simulation is 34.75m. Based on the above findings, the height of waterproof pillar(rock) of Xinli district is 54m.

Key words: waterproof pillar; coastal bedrock despoit; mining undersea; water flowing fractured zone; water inrush

关于为《中国地质灾害与防治学报》征集照片的启事

为了使本刊论文内容更加形象、生动,便于读者清晰地识别地质灾害的各种地质作用及现象,反映治理措施及治后效果,本刊每期另附彩版照片。凡为彩版或封面提供照片者,每版应附 100~500 字说明,每张照片也应有相应说明。为保证出版效果,请提供原照片;若用数码相机拍摄,请采用 200 万像素以上的模式拍照。照片的分辨率应在 1600×1200 dpi 以上(Fine 或 High 模式);如照片文件为扫描版,请采用 600 dpi 以上的设置扫描。如用电子邮件发送,请提供照片的原电子文档 JPG 格式(勿自行用 Photoshop 或 ACDsee 等软件处理),以保证照片的清晰度。另请提供 1 份 Word 文档,但其仅供排版时参考,不能作为印刷、排版的原始稿件。提供的照片采用刊登后,付稿酬。欢迎各地、各界同仁踊跃选送各种典型照片(含国外照片)。

感谢您的支持与合作!

本刊网址: <http://zgdzzyfz.paperopen.com>

电子信箱: zgdh@chinajournal.net.cn zgdh@mail.cigem.gov.cn

《中国地质灾害与防治学报》编辑部