

基于均匀实验的萨热克铜矿嗣后充填 参数数值模拟研究

Research of Stope Structure and Backfill Parameter of Sareke Copper Mine by Using Uniform Design

高 进(大冶有色金属有限责任公司, 湖北 黄石 435005)

摘要:为确保萨热克铜矿分段空场嗣后充填采矿法采场稳定性,确定合适的采场结构及充填工艺参数,基于均匀实验设计方法,采用FLAC^{3D}软件分别模拟了矿房顶部充填高度、顶底部水灰比强度和中间层水灰比强度三个因素开采效果的影响,得到顶板位移、底板位移与顶底板充填高度、顶底板水灰比、中间充填层水灰比关系式。结果表明,顶底板充填高度越大,水灰比越大则顶板位移越小,即充填效果越好。推荐矿山采用灰砂比为1:6充填料对采场进行嗣后充填,可有效控制采场围岩变形,确保采场稳定。

关键词:分段空场嗣后充填;数值模拟;均匀设计;采场结构参数

中图分类号: TD853 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2023)01-0016-06

Abstract: In order to ensure that the stability of sublevel open stoping with subsequent backfilling of Sareke copper mine, and to determine the suitable stope structure and the filling process parameters, based on uniform design method, experiments respectively using FLAC^{3D} to simulate the filling height, at the bottom of the mine roof water cement ratio at the bottom of the top strength and middle tier intensity of water-cement ratio, and the effects of three factors in mining. The measured displacement of roof, floor and roof and floor filling height, roof and floor, water cement ratio, intermediate water cement ratio relation between the filling layer. The results showed that the roof and floor filling height, the greater the water cement ratio, the greater the roof displacement is smaller, the filling effect is better. Recommended mining using contrast filling material for 1:6 for stope filling, later can effectively control the stope wall rock deformation, to ensure the stope stability.

Key words: open stoping with subsequent backfilling; simulation; uniform designs; stope structure parameter

1 前言

分段空场嗣后充填采矿方法具有回采效率高、安全可靠等优点,在国内地下矿山越来越多的被采用。但是分段空场嗣后充填采矿方法爆破工程量大、矿房跨度大,对充填体质量要求高^[1-2],因而选择合适的采场结构参数是该采矿方法应用成功与否的关键。黄明清等^[3]基于FLAC^{2D}原理研究了缓倾斜中厚矿体空场嗣后充填法在不同采场结构参数及不同回采阶段的采场稳定性,优化后的采场结构参数为采场沿走向宽度36 m,其中矿房31 m间柱5 m,实践证明该方案在安全性及经济性上能满足生产要求。余海华等^[4]结合金山店铁矿张福山矿区阶段空场嗣后充填法开采的实际,在相同充填配比下,矿柱宽度从15 m增加到18 m,矿柱承受的最大

应力值由23.3 MPa减少到23.1 MPa,顶板下沉位移由22.2 mm增加到27.7 mm;经综合分析比较,确定合理的矿房矿柱宽度为15 m,充填配比为1:8。通过对采场结构参数的合理优化,极大的提高了采矿效率,确保了采场的稳定。张海波^[5]对某铁矿嗣后充填采场的结构参数进行了研究,采用材料力学“简支梁”理论计算及FLAC数值模拟相结合的手段分析了采场顶板的安全合理跨度,确定矿房、矿柱宽度为18 m时是比较合理的。周华林^[6]空场嗣后充填采矿法充填体合理强度分布规律研究,通过数值模拟研究采场进行3种不同的充填方案的采场稳定性分析,并从力学的角度对3种方案分析比较,包括每个回采和充填步骤的矿柱最大主应力,矿柱拉应力,充填体的拉应力以及充填体在垂直高度上的拉应力分布情况,最后确定合理的充填方案。

本文以萨热克铜矿Ⅱ矿体采用垂直走向分段空场嗣后充填法开采为工程背景,基于均匀实验设计,采用FLAC^{3D}模拟分析了不同充填工况时,嗣后充填采场的稳定性,以期得到合理的充填工艺参数。

[作者简介] 高进(1976—),男,采矿高级工程师,从事矿山采矿技术工作。

[引用格式] 高进. 基于均匀实验的萨热克铜矿嗣后充填参数数值模拟研究[J]. 中国矿山工程, 2023, 52(1): 16-21.

2 矿山概况

2.1 开采技术条件

萨热克铜矿位于新疆克州乌恰县,Ⅱ矿体为矿山主矿体,矿体整体沿走向上长1050 m,倾向延伸约1360 m,平均厚度7.10 m,矿体厚度较稳定,矿体最大真厚度31.45 m,矿体铜平均品位1.09%,产于灰、浅灰绿色砾岩中。矿体呈层状,产状 $170^{\circ} \sim 160^{\circ}$ 。地表附近矿体倾角 $50^{\circ} \sim 60^{\circ}$,深部变为 $45^{\circ} \sim 30^{\circ}$,与地层一致。矿体延伸稳定,中间厚大,两端变薄,形态简单~较简单,厚度较稳定,主要组份分布较均匀,厚度、品位变化较小,属比较稳定型的层状、似层状矿体。矿体上、下盘围岩均为砾岩、砂岩、粉砂岩,细粒-中粒致密块状,特别是近矿部位硅化强烈,岩石坚硬,稳固性好,不需支护。矿体内及后期断裂不太发育,多呈平行的小断面,贯通性差;矿石为沉积加改造型,较坚硬。由于地形切割陡峻,大气降水多呈洪水、溪水排泄,地表溪流水量较小,季

节性特征明显,因此其水文地质条件属层内、层间裂隙充水矿床较复杂型。

2.2 采矿方法

萨热克铜矿主要采用垂直走向分段空场嗣后充填法采矿,矿房和矿柱宽都是15 m,长度即为矿体的水平厚度,中段高60 m,分为4个分段,每分段高15 m。采场底部为平底结构。在矿体上盘掘进切割天井,拉开形成切割槽。采用脉外采准方式,在矿体的下盘布置分段巷道和溜井。各分段之间通过斜坡道相联通,人员、材料、设备通过斜坡道和分段联络道进入各分段巷道,再通过凿岩巷道进入采场作业。回采分为两个步骤,回采顺序是先采矿房,后采矿柱。采用中深孔凿岩台车在分段凿岩巷道内凿上向扇形炮孔,每次爆2~3排孔,可以多分段同时侧向崩矿,爆破后形成梯段工作面。爆下的矿石使用柴油铲运机出矿。典型采矿方法如图1所示。

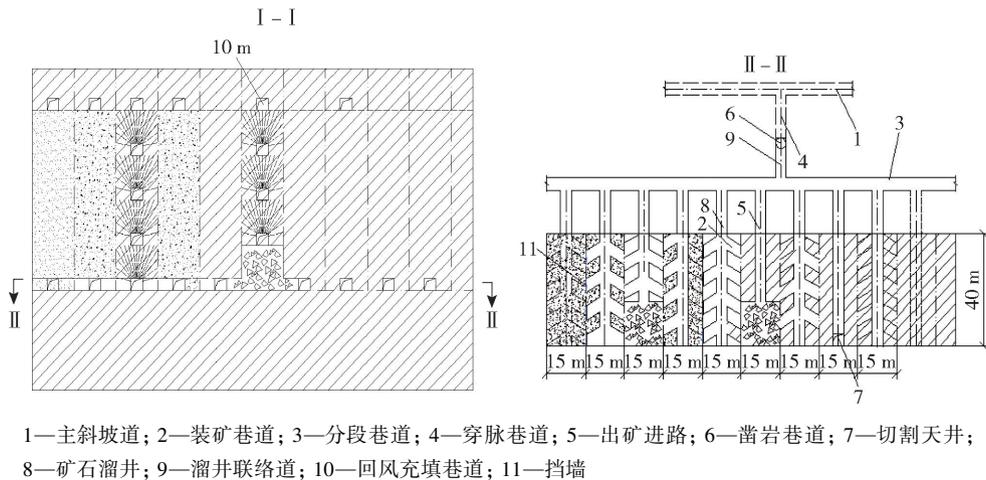


图1 分段空场嗣后充填法图

3 模型与方法

3.1 岩体力学参数

岩体力学参数是数值模拟计算的基础^[7],对萨热克铜矿矿岩物理力学参数进行了测试,见表1。

表1 岩体力学测试数据

取样位置	颗粒密度	块体密度/ $g \cdot cm^{-3}$		单轴抗压 强度/MPa		软化系数
		烘干	饱和	烘干	饱和	
围岩	2.75	2.69	2.71	96.1	64.3	0.67
矿体	2.74	2.71	2.72	117	39	0.33

3.2 数值模拟本构模型选取

数值模拟是一种评价岩体稳定性的定性或定量方法,为使计算结果比较接近实际情况,需要

对岩体介质性质及计算模型作必要的假设,而且矿山地质条件一般都比较复杂,也要对矿山地质条件、受力条件、采矿工艺及采矿方案等做必要的简化处理。

(1)将岩体视为理想的弹塑性材料,选用莫尔-库仑模型,进行非线性分析。

(2)忽略断层、节理裂隙等不连续面对采场稳定性的影响。

(3)只考虑自重应力的作用,忽略地震波、爆炸冲击波、地下水等因素对采场稳定性的影响。

(4)井下的开拓巷道、采场工程等对采场围岩力学状态的影响只在局部区域,故在数值模拟中忽略其对采场围岩应力分布的影响。

构造模拟空区围岩的数值模型需定义岩体性质

的数学模型,即本构模型。萨热克铜矿围岩以砾岩、砂岩、粉砂岩为主,均属于弹塑性材料,适用于莫尔-库伦准则^[8],其力学模型为

$$f_s = \sigma_1 - \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \sigma_3 - 2C \sqrt{\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}} \quad (1)$$

式中, σ_1 、 σ_3 分别是最大和最小主应力; C 、 ϕ 分别是材料内聚力和内摩擦角; f_s 是破坏判断系数。当 $f_s \geq 0$ 时,材料处于塑性流动状态;当 $f_s \leq 0$ 时,材料处于弹性变形阶段。在拉应力状态下,如果拉应力超过

材料的抗拉强度,材料将发生拉伸破坏。

3.3 模拟方案

根据萨热克铜矿充填方案为:待矿房矿石全部出完后,集中一次充填。采场内安设好泄水管,打好隔墙;采用尾砂胶结充填,在矿房顶、底部 7.5 m 厚进行水灰比 1:6 的胶结充填,中间可采用水灰比 1:8 的胶结充填;待矿柱矿石全部出完后,矿柱顶、底部 15 m 厚进行灰砂比 1:6 的胶结充填,中间可采用尾砂非胶结充填,充填方案如图 1 所示。

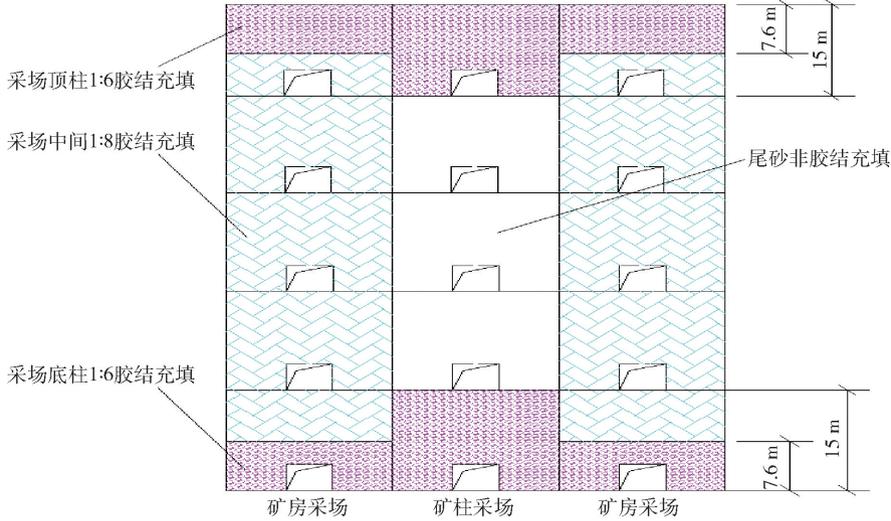


图2 萨热克铜矿充填方案

均匀设计方法是一种有效的多因素、多水平试验设计方法^[9-10],在解决多因素多水平试验问题时,相对于单因素试验设计和正交设计具有试验点分布均匀和试验次数少的优点,尤其适合于各因素之间有交互作用的情况。

因此,数值模拟需要考虑的因素定为矿房顶底部充填高度,顶底部水灰比强度和中间层水灰比强度三个因素,现总结各因素和水平见表 2。

表2 充填试验考虑的因素和水平

水平	顶底部充填高度/m	顶底部充填水灰比	中间层充填水灰比
水平 1	2.5	1:4	1:6
水平 2	5	1:6	1:8
水平 3	7.5	1:8	1:10
水平 4	10	1:10	1:12

采用均匀试验设计的方法设计的试验方案见表 3。

4 模拟结果分析

4.1 分层充填效果分析

应用 FLAC^{3D} 模拟研究分析采场分层充填的效果,模拟采场初始开挖未充填、底板充填后、中间层

表3 均匀试验设计表

试验号	顶底部充填高度/m	顶底部充填水灰比	中间层充填水灰比
实验 1	7.5	1:10	1:10
实验 2	5	1:4	1:12
实验 3	2.5	1:8	1:6
实验 4	10	1:6	1:8

充填后和接顶充填后四种情况的位移等值线图,并分别提取了四种情况下的顶板和底板的位移变化情况曲线,分层充填位移等值线图如图 3 所示。

结合图 3 进行分析,可以看出:

(1)从宏观上看,无论是顶板或是底板的位移都呈现出巷道中部大于巷道两端的趋势。这是由于巷道两端存在围岩和阶段运输巷,产生了支承作用,使得位移降低,而在巷道中部,在重力作用下,其位移必然会大于巷道两端。

(2)底板充填后,矿房底板的位移值立刻减小,从未充填时 12.82 mm 下降至接近 9.43 mm,减小了 26.4%,但是顶板的位移并未产生显著的变化;并且由于底板充填高度只有 10 m,充填体内部也未产生位移。

(3)中间层充填后,矿房顶板和底板的位移均

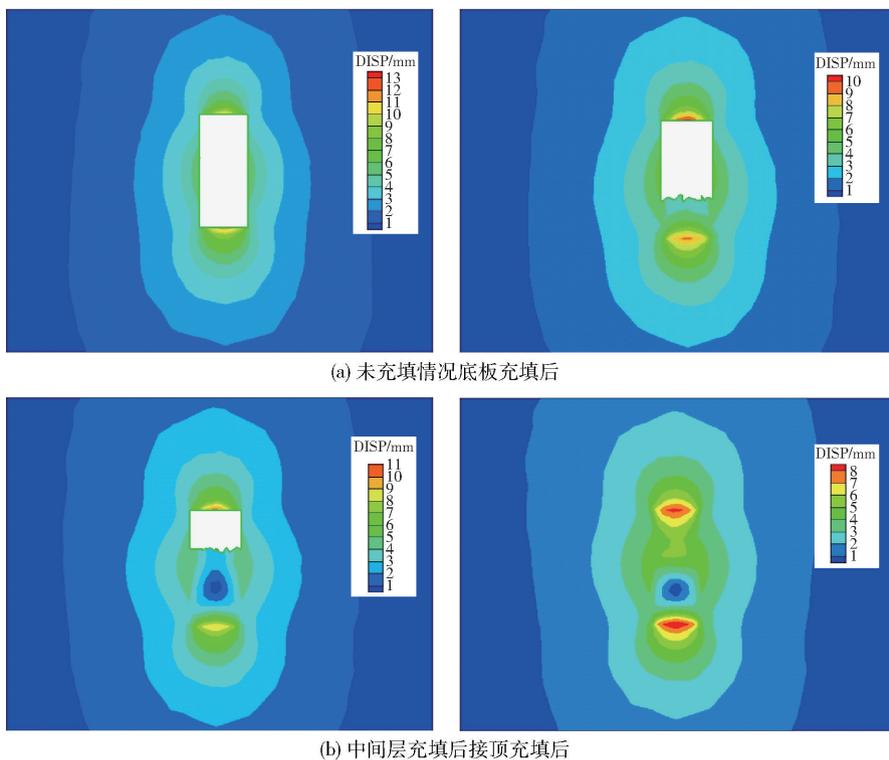


图 3 分层充填位移等值线图

没有显著变化, 不过此时充填体已达到 20 m 高, 其自重将对位移产生影响, 从位移等值线也可以看出, 充填体内部产生细微位移, 其大小约为 1 mm。

(4) 接顶充填后, 矿房顶板位移产生显著变化, 由 11.67 mm 下降至 8.67 mm, 下降了 25.7%, 而底板位移并未产生显著变化。此时, 从位移等值线图可以看出, 充填体内部位移并未显著增大, 而且还是相对集中于底板和中间层中, 接顶层中并未产生位移, 具体位移变化如图 4、图 5 所示。

4.2 优选充填方案

为了确定合适的充填体强度和顶底板充填高度, 在室内对不同配比的尾砂胶结充填体进行力学试验, 得出充填体抗压、抗拉强度变化主要受到灰砂比、浓度、养护龄期的影响。同时采用正交试验并进行极差分析的方法对抗压强度分析可知, 养护龄期对该矿山尾砂胶结充填体强度影响最显著, 并建立了充填体强度随养护龄期变化的三次多项式数学模型。将按均匀试验设计的四种试验方案进行模拟, 获得了图 6 所示的位移等值线图。

从以上图 6 可以看出:

(1) 在不同充填配比和不同充填高度条件下, 巷道位移整体依然呈现出巷道中部位移较大而巷道两端位移较小的趋势, 这和分层充填条件下反映的规律是一致的, 具体如图 7、图 8 所示。

(2) 试验 1 针对顶板的位移变化影响较小, 而其余的试验都使得顶板和底板位移显著减小。

(3) 不同充填试验对底板沉降的影响较小, 无论使用何种配比或采用何种充填高度, 底板位移值变化不明显。

5 试验结果回归分析

对一个随机变量与一个或多个可控变量之间的变化关系进行研究, 查找变量间具有因果变化关系, 相应的统计分析方法称为回归分析。为了

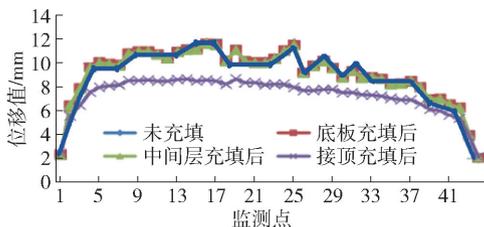


图 4 分层充填顶板位移变化

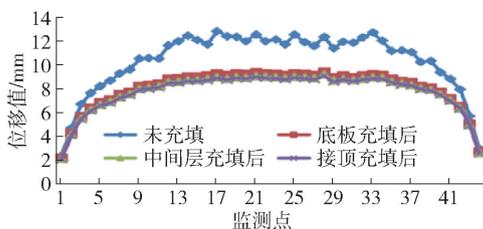


图 5 分层充填底板位移变化

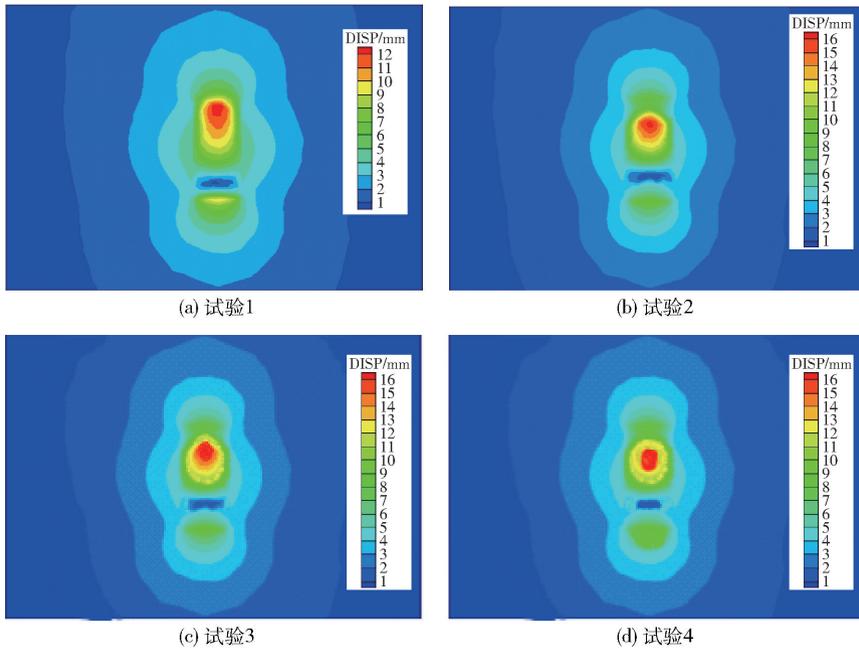


图6 充填试验位移等值线图

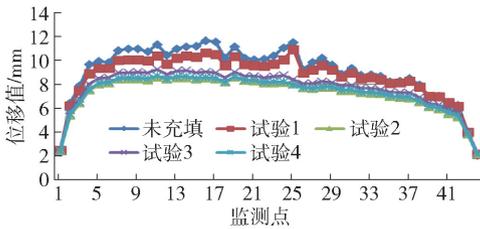


图7 充填试验顶板位移变化

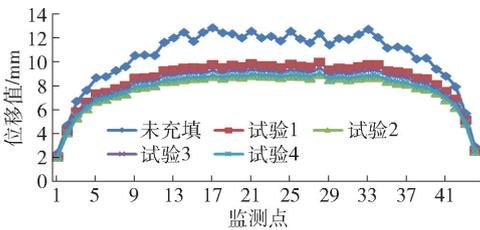


图8 充填试验底板位移变化

表4 充填试验统计表

试验号	顶底板充填高 (X_1)	顶底板水灰比 (X_2)	中间层水灰比 (X_3)	顶板位移 (Y_1)	底板位移 (Y_2)
1	7.5	10	10	10.94	9.97
2	5	4	12	8.61	8.91
3	2.5	8	6	9.25	9.49
4	10	6	8	8.71	9.07

顶底板充填高度越大,水灰比越大则顶板位移越小,即为充填效果越好,这和现场试验的结果是一致的。接下来,利用回归方程对全面试验所有的搭配结果进行计算,获得各种搭配条件下顶板沉降数值,预测见表5。

将全面试验预测的64组结果以从小到大进行排列,可以发现:

(1) 预测的64组试验结果可以分为16组,其中每个组别具有相同的顶底板水灰比和中间层水灰比,并且,顶底板充填高度越大顶板沉降值越小。

(2) 各组试验结果总体呈现出越好的水灰比强度搭配方案沉降值越小的趋势,例如:第一组试验中采用1:4和1:6作为顶底板和中间层充填体强度,这是本次试验设计中最好的强度方案,因此其沉降也是最小的。

(3) 存在一些例外情况,例如第4组试验采取的是矿房整体1:6充填的方案,而其沉降值小于以1:4和1:12作为充填体强度的方案;而综合第4组和

更加精确的分析各因素对顶板和底板位移的影响,将各个试验中顶底板最大位移值进行统计,并进行多元线性回归分析,得到回归方程。值得说明的是,为了数据处理的方便,将水灰比取为倒数,如水灰比1:4的试验,在进行回归分析时记为4:1。具体统计见表4。

获得回归方程为

$$y_1 = -0.034x_1 + 0.456x_2 + 0.199x_3 + 4.418$$

$$y_2 = -0.0144x_1 + 0.196x_2 + 0.04x_3 + 7.718 \quad (1)$$

显然,无论是哪个因素,对底板位移的影响程度显然小于对顶板位移的影响,因此,接下来的分析中,只考虑顶板位移的分析。从方程(1)可以得到,

第8组的方案来看,采场采用整体1:6进行充填的方案可以有效减少矿山充填工作的各个环节和工序,并且比使用1:8和1:6的充填方案顶板位移值更小;针对以上分析,并考虑到未充填时顶板沉降值达到11.67 mm,因此充填效果不太明显的第12组方案被排除。

表5 全面试验顶板沉降预测表

组别	X_1	X_2	X_3	Y	组别	X_1	X_2	X_3	Y
1	10	4	6	7.40	9	10	6	12	9.51
	7.5	4	6	7.41		7.5	6	12	9.51
	5.0	4	6	7.42		5.0	6	12	9.52
	2.5	4	6	7.43		2.5	6	12	9.53
2	10	4	8	7.80	10	10	8	8	9.62
	7.5	4	8	7.81		7.5	8	8	9.63
	5.0	4	8	7.82		5.0	8	8	9.64
	2.5	4	8	7.82		2.5	8	8	9.65
3	10	4	10	8.20	11	10	8	10	10.02
	7.5	4	10	8.20		7.5	8	10	10.03
	5.0	4	10	8.21		5.0	8	10	10.04
	2.5	4	10	8.22		2.5	8	10	10.05
4	10	6	6	8.31	12	10	10	6	10.14
	7.5	6	6	8.32		7.5	10	6	10.15
	5.0	6	6	8.33		5.0	10	6	10.15
	2.5	6	6	8.34		2.5	10	6	10.16
5	10	4	12	8.59	13	10	8	12	10.42
	7.5	4	12	8.60		7.5	8	12	10.43
	5.0	4	12	8.61		5.0	8	12	10.43
	2.5	4	12	8.62		2.5	8	12	10.44
6	10	6	8	8.71	14	10	10	8	10.53
	7.5	6	8	8.72		7.5	10	8	10.54
	5.0	6	8	8.73		5.0	10	8	10.55
	2.5	6	8	8.74		2.5	10	8	10.56
7	10	6	10	9.11	15	10	10	10	10.93
	7.5	6	10	9.12		7.5	10	10	10.94
	5.0	6	10	9.12		5.0	10	10	10.95
	2.5	6	10	9.13		2.5	10	10	10.96
8	10	8	6	9.22	16	10	10	12	11.33
	7.5	8	6	9.23		7.5	10	12	11.34
	5.0	8	6	9.24		5.0	10	12	11.35
	2.5	8	6	9.25		2.5	10	12	11.35

综上所述,推荐采场充填使用整体1:6的水灰比进行充填,既能保障矿山的安全,又不至于浪费充填材料。

6 结论

(1)采场底板充填后,矿房底板的位移值立刻

减小,从未充填时12.82 mm下降至接近9.43 mm,减小了26.4%,但是采场顶板的位移并未产生显著的变化;采场中间层充填后,矿房顶板和底板的位移均没有显著变化,其自重将对位移产生影响,从位移等值线也可以看出,采场充填体内部产生细微位移;接顶充填后,矿房采场顶板位移产生显著变化,由11.67 mm下降至8.67 mm,下降了25.7%,而采场底板位移并未产生显著变化。

(2)通过回归分析,得到采场顶板位移、底板位移与顶底板充填高度、顶底板水灰比、中间充填层水灰比关系式,得到无论是哪个因素,对采场底板位移的影响程度显然小于对顶板位移的影响。采场顶底板充填高度越大,水灰比越大则顶板位移越小,即充填效果越好。

(3)通过模拟分析,推荐萨热克铜矿采场充填采用灰砂比为1:6充填料对采场进行嗣后充填,可有效控制采场围岩变形,确保采场稳定,为矿山实际开采提供一定的参考。

[参考文献]

- [1] 徐文彬,宋卫东,万海文,等.大阶段嗣后充填回采顺序及出矿控制技术研究[J].金属矿山,2011,6(6):13-15.
- [2] 叶加冕,蒋京名,王李管,等.采场结构参数优化的数值模拟研究[J].中国矿业,2010,19(3):61-65.
- [3] 黄明清,吴爱祥,王贻明,等.基于FLAC^{2D}的空场嗣后充填法采场结构参数优化[J].铜业工程,2014,(1):23-27.
- [4] 余海华,宋卫东,唐亚男,等.阶段空场嗣后充填法采场结构参数及充填配比优化[J].矿业研究与开发,2012,32(6):10-14.
- [5] 张海波,李示波,张扬,等.金属矿山嗣后充填采场顶板合理跨度参数研究及建议[J].金属矿山,2014,(6):21-24.
- [6] 周华林.空场嗣后充填采矿法充填体合理强度分布规律研究[D].武汉:武汉理工大学,2012.
- [7] 秦艳华,王晓军,钟春晖,等.矿柱回采对采空区稳定性影响数值模拟研究[J].铜业工程,2007(3):8-10.
- [8] 于学馥,郑颖人,刘怀恒,等.地下工程围岩稳定分析[M].北京:煤炭工业出版社,1983.
- [9] 方开泰.均匀设计与均匀设计表[M].北京:科学出版社,1994.
- [10] 方开泰.均匀试验设计的理论、方法和应用—历史回顾[J].数理统计与管理,2004,23(3):69-80.