

应用研究·非煤矿山·

# 基于尾矿胶结回填技术的露天矿坑 回填治理研究

Study on Treatment of Open Pit Based on Coemented Backfilling Technology of Tailings

牛文杰<sup>1</sup>, 陈峰<sup>1</sup>, 宁辰禹<sup>1</sup>, 吴迪<sup>2</sup>

(1. 鞍钢集团矿业设计研究院有限公司, 辽宁鞍山 114000; 2. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083)

**摘要:**尾矿胶结地表堆存技术为解决尾矿处理和露天采坑复垦回填提供了一种新的途径,本文以鞍钢集团大孤山铁矿为工程背景,对充填体料浆配比方式以及所形成充填体的力学性能进行了研究。在确定矿坑充填治理采用的充填料浆配比后,利用 COMSOL 数值模拟软件从应力演化过程和位移分布情况两个方面对充填过程中矿坑封底结构稳定性进行了评估。研究表明,采用既有矿坑充填治理方案能够满足各方面要求。

**关键词:**矿坑回填; 数值模拟; 充填治理; 料浆配比

中图分类号: TD981

文献标志码: A

文章编号: 1672-609X(2023)02-0007-08

**Abstract:** The consolidated surface stacking technology of tailings provides a new way to solve the tailings treatment and the reclamation and backfilling of open pit. Based on the engineering background of Dagushan Iron Mine of Anshan Iron and Steel Group, this paper studies the slurry ratio of backfill body and the mechanical properties of the backfill body formed. After determining the ratio of filling slurry used in the pit filling treatment, COMSOL numerical simulation software was used to evaluate the stability of the pit bottom cover structure in the filling process from two aspects of stress evolution process and displacement distribution. The results show that the existing mine filling treatment scheme can meet all requirements.

**Key words:** pit backfill; numerical simulation; filling treatment; slurry ratio

## 1 前言

大孤山铁矿隶属鞍钢集团矿业有限公司,是鞍钢铁矿石原料主要生产基地之一,自建矿以来,历经多年的开采,从原来 260 m 高的孤山顶采至当前 -354 m 左右的大型深凹露天铁矿,现矿区内最高标高 128 m,已形成东西长 1 700 m、南北宽 1 520 m、垂直深达 400 m 椭圆形露天矿坑。目前大孤山铁矿正在进行露天生产,经设计估算,露天开采预计 2024 年 3 月结束,届时将由露天开采转为井下开采,同时需要对露天矿坑进行复垦,恢复矿区原有生态环境。

尾矿胶结地表堆存技术为解决尾矿处理和露天采坑复垦回填提供了一种新的途径<sup>[1-2]</sup>。尾矿回填

料浆具有不离析、泌水少的特性,可以减少地下水的污染;尾矿胶结料浆可以利用充填站进行制备,不需单独建立制备系统,减少了投资;料浆可以采用管道输送,运输更加便捷;料浆具有流动性,可以顺利扩散至库区边界,增加暴露面积,固结效果好。因此,在露天采坑中实现尾矿胶结堆排,对于矿山固体废弃物有效处理,生态环境保护以及解决矿坑边坡稳定性方面<sup>[3-7]</sup>都具有重要的意义。本文对充填料浆的配比方式,最终形成充填体的力学性能以及相关参数进行研究,最终选出合适的充填配比方式。利用 COMSOL 软件对矿坑充填治理过程中矿坑封底结构的应力演化规律和位移分布情况进行研究<sup>[8-9]</sup>,回填治理方案的可行性。

## 2 试验

### 2.1 试验材料

实验用到的材料主要包括全尾砂、胶结剂和水。其中胶结剂选用的是普通硅酸盐水泥(标号 P. O42. 5),全尾砂则是选用自鞍山大孤山铁矿,实

[作者简介] 牛文杰(1975—),男,高级工程师,从事露天矿坑研究工作。

[引用格式] 牛文杰,陈峰,宁辰禹,等. 大孤山铁矿露天矿坑回填治理研究[J]. 中国矿山工程,2023,52(2):7-14.

验用水为普通自来水。考虑到尾砂作为充填料浆的骨架材料,对最终所形成的充填体性能影响较大,因此本文利用激光粒度仪对尾砂的粒径分布情况进行了测试,图1所示为试验测得的全尾砂粒度分布图,通过整理测试数据可得到表1所示的粒度分布表和表2所示的粒径相关特征参数, $d_{10}$ 为颗粒累积分布为10%的粒径,即小于此粒径的颗粒体积含量占全部颗粒的10%。通常认为,尾砂中小于 $20\ \mu\text{m}$ 的颗粒占比超过15%时,该尾砂所制料浆具有较好的保水性<sup>[10]</sup>,从表1可知试验所用尾砂的该项参数为27.86%,满足基本要求。另外,从不均匀系数和曲率系数来看,该尾砂的粒径分布范围和分布连续性均满足尾砂充填的一般性要求。

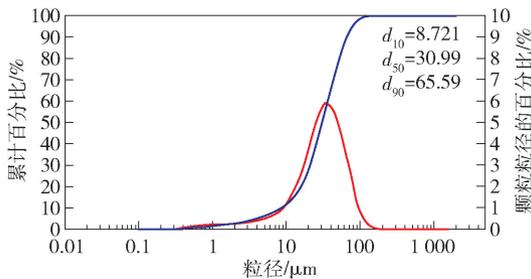


图1 全尾砂粒度分布图

表1 试验尾砂粒度分布

粒径/ $\mu\text{m}$	<2	2~20	20~45	45~75	$\geq 75$
含量/%	2.94	24.92	44.58	21.56	6

表2 试验全尾砂基本性能参数

比重/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	容重/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	$d_{10}/\mu\text{m}$	$d_{25}/\mu\text{m}$	$d_{50}/\mu\text{m}$	$d_{90}/\mu\text{m}$	不均匀系数 $C_u$	曲率系数 $C_c$
2.8	1.62	8.72	18.51	30.99	65.59	4.12	1.31

## 2.2 试验方案

本试验采用料浆浓度控制为68%、70%和72%,灰砂比设置1:4、1:10、1:15、1:20共四种,养护时间取3 d、7 d和28 d共三种龄期。测试内容包括试件的单轴抗压试验和楔形剪切试验,其中楔形剪切试验的模具包括 $20^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $40^\circ$ 和 $45^\circ$ 四种,每个模具均需要进行试验,以提高拟合精确度,每次试验需要3个试块,求其平均值作为本次试验的结果。具体试验方案见表3。

## 2.3 试验设备与方法

试验主要分为原材料的准备(烘干、剔除结块等)、料浆配制、试块浇筑、试块养护和测试共五个部分。需要说明的是单轴抗压强度试验所用的是

表3 充填体力学参数试验方案

参数名称	料浆浓度	灰砂比	养护龄期	测试内容
参数设置	68%	1:4	3 d	单轴抗压试验
	70%	1:10	7 d	
	72%	1:15	28 d	楔形剪切试验
		1:20		

5 cm × 10 cm 的圆柱形试模,而楔形剪切试验所用的则为7.07 cm × 7.07 cm × 7.07 cm 正方体试模,最终浇筑形成的试件如图2所示。



图2 浇筑形成试件

单轴抗压强度测试试验采用的设备是“东测电脑恒应力压力试验机”,进行测试时将试块放置在压力试验机压板中心,并清除试块受压面和上下加压板间的砂粒或杂物。加载时,压力机的加载速度按规定应为 $5.0 \pm 0.5\ \text{kN}$ ,但在试块刚开始受力时,加载速度应小于这一数值,以便使球座有调节的余地,在接近破坏时严格控制加载速度于规定值范围。楔形剪切试验采用的是BC-300D型电脑恒应力压力试验机,试验中所使用的模具共有4套不同的角度,分别为 $20^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $40^\circ$ 和 $45^\circ$ ,每个角度通常取3~5个试块,每个试块均为边长70.7 mm的立方体。具体试验如图3所示。



图3 抗压与剪切试验

## 3 试验结果与分析

### 3.1 单轴抗压强度

表4为不同配比方案的3 d、7 d和28 d龄期的强度测试结果,从测试结果可以看出,随着料浆浓度

的增加,不同灰砂比各龄期的单轴抗压强度均有所增长。当料浆浓度较小时(68%),7 d、28 d 单轴抗压强度增长较慢,而料浆浓度较大时(70%、72%),7 d、28 d 单轴抗压强度增长较快;随着灰砂比的提高,即水泥掺量的增加,各组试件的抗压强度也会相应提升。当灰砂比小于 1:15 时,3 d、7 d、28 d 的单轴抗压强度距离较近,胶结体试件抗压强度增长速度并不明显。当灰砂比较大(1:15 以上),抗压强度增长速度变得明显起来。这主要是由于在水泥掺量较低时,其胶结能力得不到发挥,宏观上表现为各龄期试件强度在绝对值上差异不明显。在浓度相同的前提下,灰砂比越大的配比,其强度随龄期增长的幅度和速度要更加明显,此处以 70% 浓度下的四组试件为例,作料浆龄期-灰砂比强度关系曲线如图 4 所示,其余浓度规律类同。

表 4 单轴抗压强度试验结果

料浆浓度	灰砂比	3 d 强度/MPa	7 d 强度/MPa	28 d 强度/MPa
68%	1:4	1.09	2.48	4.08
	1:10	0.72	1.15	1.53
	1:15	0.37	0.76	1.07
	1:20	0.21	0.38	0.54
70%	1:4	1.14	2.59	4.26
	1:10	0.77	1.23	1.62
	1:15	0.43	0.79	1.16
	1:20	0.31	0.42	0.63
72%	1:4	1.48	3.33	4.65
	1:10	0.87	1.37	1.79
	1:15	0.49	0.88	1.25
	1:20	0.38	0.45	0.76

### 3.2 弹性模量

关于试件的弹性模量,北京科技大学王勇博士在其博士论文《初温效应下膏体多场性能关联机制及力学特性》中研究得出了全尾砂中添加胶凝材料后弹性模量与单轴抗压强度之间的关系式,并指出该公式与混凝土领域强度和弹性模量的关系一致。本文采用该方法换算得出各试件的弹性模量,换算结果见表 5。

$$E = 81.056 \sqrt{UCS} - 18.671 \quad (1)$$

式中, $E$  为全尾砂固结体的弹性模量,MPa; $UCS$  为全尾砂固结体的单轴抗压强度,MPa。

表 5 弹性模量试验结果

料浆浓度	水灰比	3 d 弹模/MPa	7 d 弹模/MPa	28 d 弹模/MPa
68%	1:4	65.95	108.98	145.05
	1:10	50.11	68.25	81.59
	1:15	30.63	51.99	65.17
	1:20	18.47	31.30	40.89
70%	1:4	67.87	111.78	148.63
	1:10	52.46	71.22	84.50
	1:15	34.48	53.37	68.63
	1:20	26.46	33.86	45.67
72%	1:4	79.94	129.24	156.12
	1:10	56.93	76.20	89.77
	1:15	38.07	57.37	71.95
	1:20	31.30	35.70	51.99

### 3.3 剪切强度

采用不同角度的磨具,可得出相同浓度、相同灰砂比和养护龄期下同一种试块的抗压强度和抗剪强度,采用 20°、30°、40° 和 45° 模具,在  $\tau$ - $\sigma$  坐标系中将得到两个不同的点,采用 Origin 软件进行线性拟合,结果见表 6。

随着灰砂比的增加,胶结体内聚力呈增长趋势,随着料浆浓度的增大,内聚力也有显著的增大。内聚力增加说明水化反应增加了尾砂颗粒之间的黏结力,而灰砂比的增加恰恰提供了更多的水化产物,增大了这种黏结力。料浆浓度的增加虽有可能降低反应的程度,但由于其泌出水少,孔隙较少,胶结体内颗粒间黏结力更大。随着胶结体养护龄期的增加,胶结体内聚力显著增加。其中,相比于养护 3 d 时的变化幅度,养护 7 d、28 d 时的胶结体内聚力增加

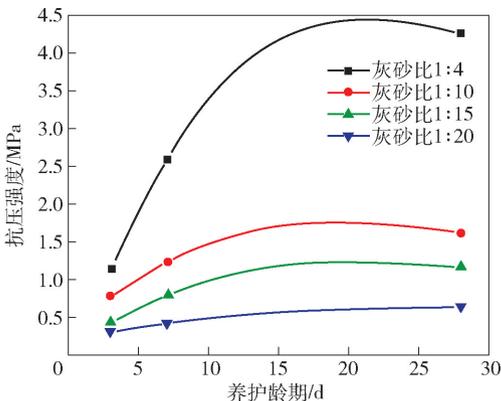


图 4 料浆龄期-灰砂比强度关系曲线(70% 浓度)

表6 各配比试件  $C$  值和  $\phi$  值

料浆 浓度/%	灰砂比	内聚力 $C$ /MPa			$\tan\phi$			$\phi/(\circ)$		
		3 d	7 d	28 d	3 d	7 d	28 d	3 d	7 d	28 d
72	1:4	0.52	1.64	2.17	0.42	0.45	0.56	22.78	24.23	29.25
	1:10	0.48	0.71	1.96	0.08	0.53	0.26	4.57	27.92	14.57
	1:15	0.31	0.83	1.64	0.34	0.38	0.32	18.78	20.81	17.74
	1:20	0.11	0.35	0.67	0.26	0.15	0.13	14.57	8.53	7.41
70	1:4	0.56	0.79	2.57	0.31	0.63	0.14	17.22	32.21	7.97
	1:10	0.21	0.54	1.28	0.64	0.60	0.51	32.62	30.96	27.02
	1:15	0.11	0.64	1.08	0.44	0.39	0.32	23.75	21.31	17.74
	1:20	0.054	0.27	0.69	0.43	0.18	0.18	23.27	10.20	10.20
68	1:4	0.34	0.68	1.87	0.49	0.72	0.52	26.10	35.75	27.47
	1:10	0.28	0.53	1.34	0.26	0.55	0.29	14.57	28.81	16.17
	1:15	0.087	0.37	0.89	0.29	0.38	0.44	16.17	20.81	23.75
	1:20	0.065	0.27	0.57	0.24	0.21	0.17	13.50	11.86	9.65

更为显著;随着灰砂比的增加,胶结体内摩擦角呈增大的趋势;而随着浓度的变化,内摩擦角的变化并无一致规律。

## 4 矿坑回填治理数值模拟

### 4.1 治理方案与数值模型建立

露天坑充填治理工程方案自下而上分为封底工程(标高-414~-354 m)、治理工程(标高-360~+70 m)。其中封底工程又包括直接底板和间接底板两个子项,而治理工程则分为过渡层和正常回填层两个子项。通过前期理论计算和相关工程类比经验确定了以下治理方案。

#### 1) 直接底板

露天回采结束后,清理边坡浮石,平整场地。底部平台处理好后,在-414 m平台上布置钢筋网。钢筋网敷设参数:钢筋网孔尺寸 $\phi 18@400\text{ mm}\times 400\text{ mm}$ 钢筋网延深到边坡,顺坡敷设2 m。

钢筋网架设完毕,采用28 d强度不低于4 MPa的充填料浆进行回填,回填标高为-414~-394 m。料浆具体为前述章节所研究的70%浓度,灰砂比1:4的配比方式。

#### 2) 间接底板

其回填标高为-394~-354 m,采用28 d强度不低于1.5 MPa的充填料浆进行回填,料浆具体为前述章节所研究的70%浓度,灰砂比1:10的配比

方式。

#### 3) 过渡层

其回填标高为-354~-300 m,采用28 d强度不低于1 MPa的充填料浆进行回填,料浆具体为前述章节所研究的70%浓度,灰砂比1:15的配比方式。

#### 4) 正常回填层

其回填标高为-300~+70 m,采用28 d强度不低于0.5 MPa的充填料浆进行回填,料浆具体为前述章节所研究的68%浓度,灰砂比1:20的配比方式。

依据到矿区地质构造情况以及数值计算模型与实际情况的吻合度和计算模型的复杂化程度,对工程地质条件作了适当处理后,利用COMSOL软件建立了如图5所示的三维有限元计算模型,并对其进行了网格划分。

### 4.2 数值模型参数与监测截面设置

利用数值模拟软件进行数值模拟计算时需要模型的边界条件和各地层的材料参数进行合理设置,否则将直接影响数值模拟的可靠性和可用性。相关材料参数主要来自于前期基础实验测得的基本参数,而边界条件则主要依据各边界的状态可设置为“自由边界”“辊支撑边界”“固定约束边界”等边界条件,具体设置见表7、表8。

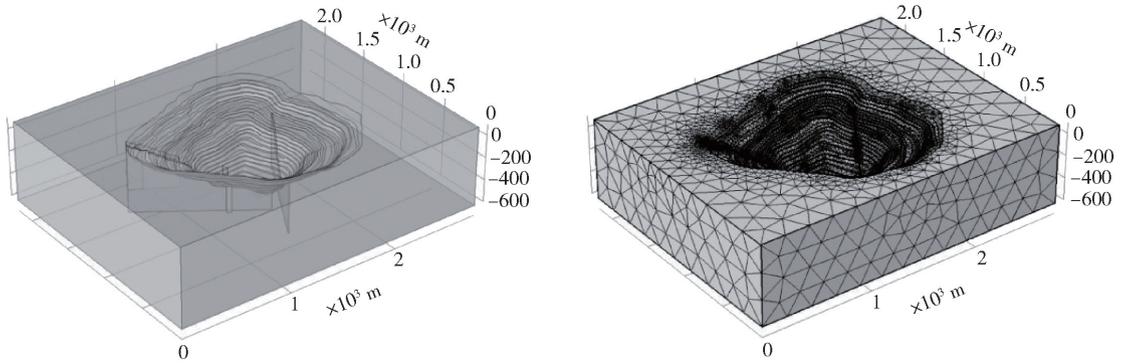


图5 数值计算三维模型及网格划分图

表7 模型边界条件

边界名称	边界条件
模型底面	固定约束
模型四周	辊支撑
模型上表面	自由
其他	自由

表8 模型材料参数

材料类型	内聚力/MPa	内摩擦角/(°)	单轴抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
变粒岩	11.759	13.65	55.661	6.055	0.274
千枚岩	43.113	34.9	58.383	6.165	0.263
花岗岩	45.265	38.6	99.848	21.053	0.433
充填体1	2.57	7.27	4.26	0.149	0.29
充填体2	1.03	4.37	1.62	0.083	0.32
充填体3	0.93	3.82	1.16	0.069	0.33
充填体4	0.77	3.23	0.54	0.052	0.35

为了更好的监测露天矿坑在充填治理过程中封底结构及围岩位移场和应力场的变化,在模型中部设置了垂直于Z轴的水平截面(Z = -400 m)作为数值对比研究的典型断面,具体的剖面设置如图6所示。

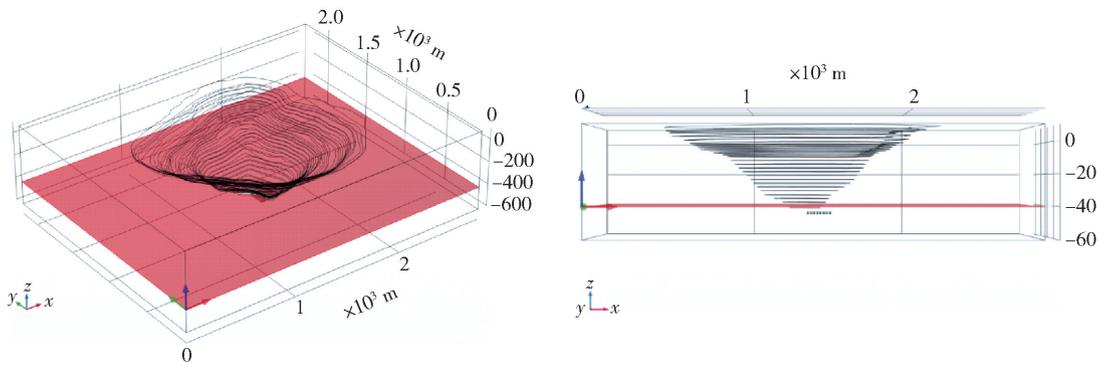


图6 监测截面设置示意图

### 4.3 模拟结果及分析

#### 1) 截面应力演化规律分析

图7(a)所示为未充填时水平截面应力分布云图,从图中可以看出该截面的应力分布大致以露天矿坑为中心呈环形向外扩展,且应力值由内向外逐步增长,在距离矿坑中心一定距离时,应力值不再增长并维持稳定。这一现象主要是由于矿坑呈倒三角形状,从矿坑中心向截面外缘该截面的

上覆岩层的厚度不断增加,一直到矿坑边缘上覆岩层的厚度不再增加,截面上的应力达到最大值后基本不变。

从图7中不同充填高度下水平截面应力分布云图,可以看出各水平截面的应力分布情况与未充填时的情况类似,充填体所受应力最小,自充填体向外应力值先增加后保持稳定。对比不同充填高度下水平截面的应力最值,可以发现截面的应力最大值整

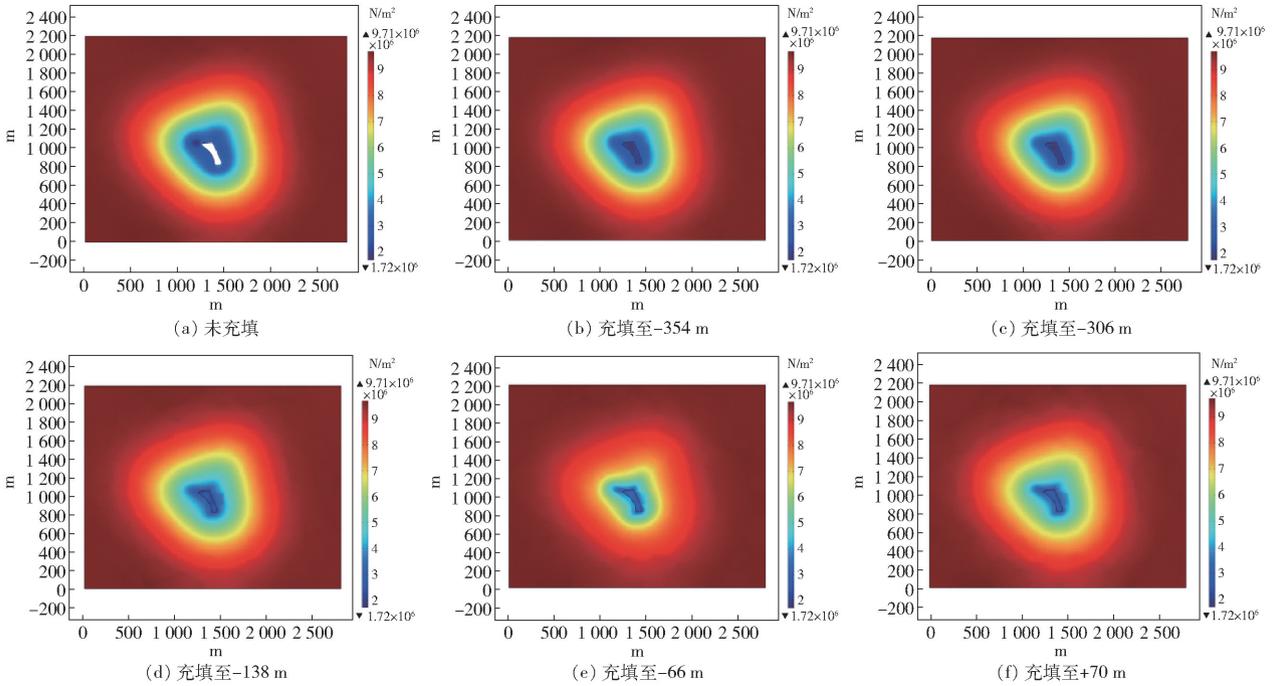


图7 水平截面应力分布云图

体变化很小,这主要是由于其最大应力是由围岩特性和埋深所决定;而截面的最小应力值变化相对较大,截面中应力最小的区域即为充填体,因此应力最小值的变化情况可表征充填体所受应力的变化情况。随着充填高度的逐渐增加,充填体所受应力呈现出先降低后增长的趋势,充填标高在-306 m之前,充填体受到的应力呈减小趋势,这主要是由于随着充填的不断进行,充填体的受力状态得到了改善,且因充填体自身具备一定承载能力,其自重对截面应力的增加影响相对较小;而充填标高超过-306 m后,充填体自重对截面应力的影响起到了主导作用,因而截面上充填体受到的应力会增加,但总体来说截面上充填体受到的应力较小,并未超过该充填体

的承载能力,整体处于安全状态。

### 2) 截面水平位移规律分析

图8(a)所示为矿坑未充填时水平截面的X方向位移分布云图,由图可知X方向位移主要发生在矿坑左右两侧,两侧位移方向均由两帮向矿坑移动,且右侧位移要大于左侧位移。这主要是因为重力作用下两侧边坡会向矿坑发生位移,而位于矿坑坑底右下方的采场可能是造成左右两侧位移相差较大的主要原因。

对比不同充填高度下水平截面X方向位移分布云图,可以发现各充填高度下的X方向位移与未充填时的分布规律一致,随着充填的不断进行,充填高度的提升会使矿坑左右两侧的X方向位移绝对

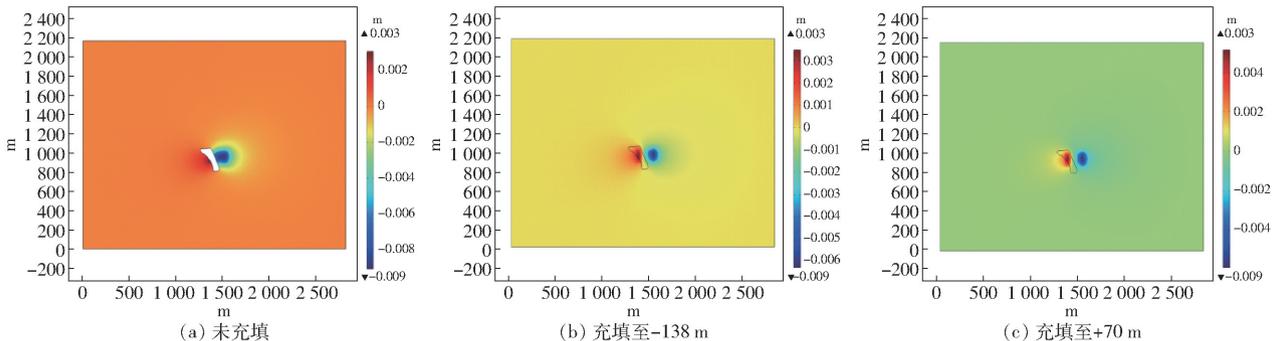


图8 水平截面X方向位移分布云图

值更加均衡,但位移的总和变化很小,基本可以忽略。而在矿坑外部一定范围之外,围岩的 X 方向位移基本为 0。总的来说,在整个矿坑的充填治理过程中,水平截面上的 X 方向位移较小,对工程影响在可控范围内。

图 9(a)所示为矿坑未充填时水平截面的 Y 方向位移分布云图,由图可知 Y 方向位移主要发生在矿坑上下(南北)两侧,两侧位移方向均由两帮向矿坑移动,北侧位移稍大于南侧位移,这主要是因为重力作用下两侧边坡会向矿坑发生位移。

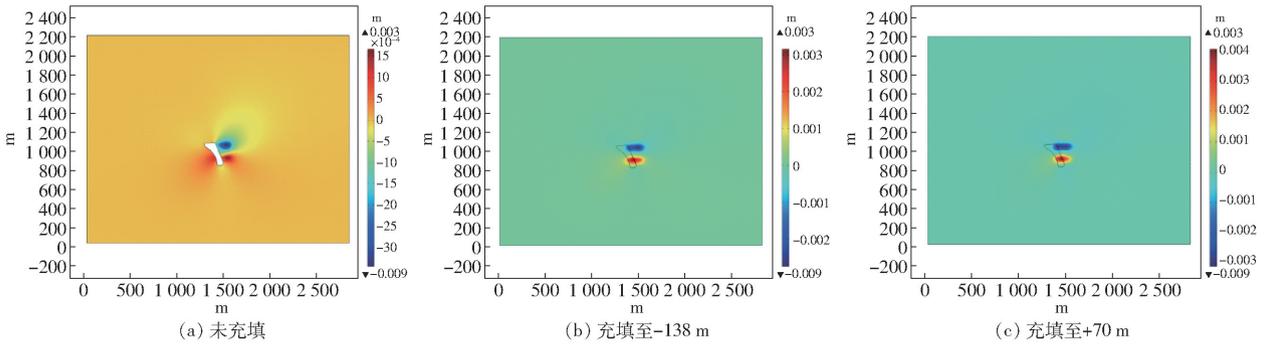


图 9 水平截面 Y 方向位移分布云图

对比不同充填高度下水平截面 Y 方向位移分布云图,可以发现各充填高度下的 Y 方向位移与未充填时的分布规律一致,受矿体开挖及矿坑边坡非对称影响,整个坑底加固结构及围岩 Y 方向位移呈非对称分布,随着充填的不断进行,充填高度的提升会使位移值略有增长,但增长十分有限。

之外,围岩的 Y 方向位移基本为 0。总的来说,在整个矿坑的充填治理过程中,水平截面上的 Y 方向位移较小,对工程影响有限。

3) 截面竖直位移规律分析

而矿坑南北两侧 Y 方向位移的分布会随着矿坑的充填而变得更加对称。而在矿坑外部一定范围

图 10(a)所示为矿坑未充填时水平截面的 Z 方向位移分布云图,其位移分布呈现出环形分布,由环形中心向外位移不断减小,其中大部分围岩的 Z 方向位移为 0。因采场的开挖导致其上方岩层的下

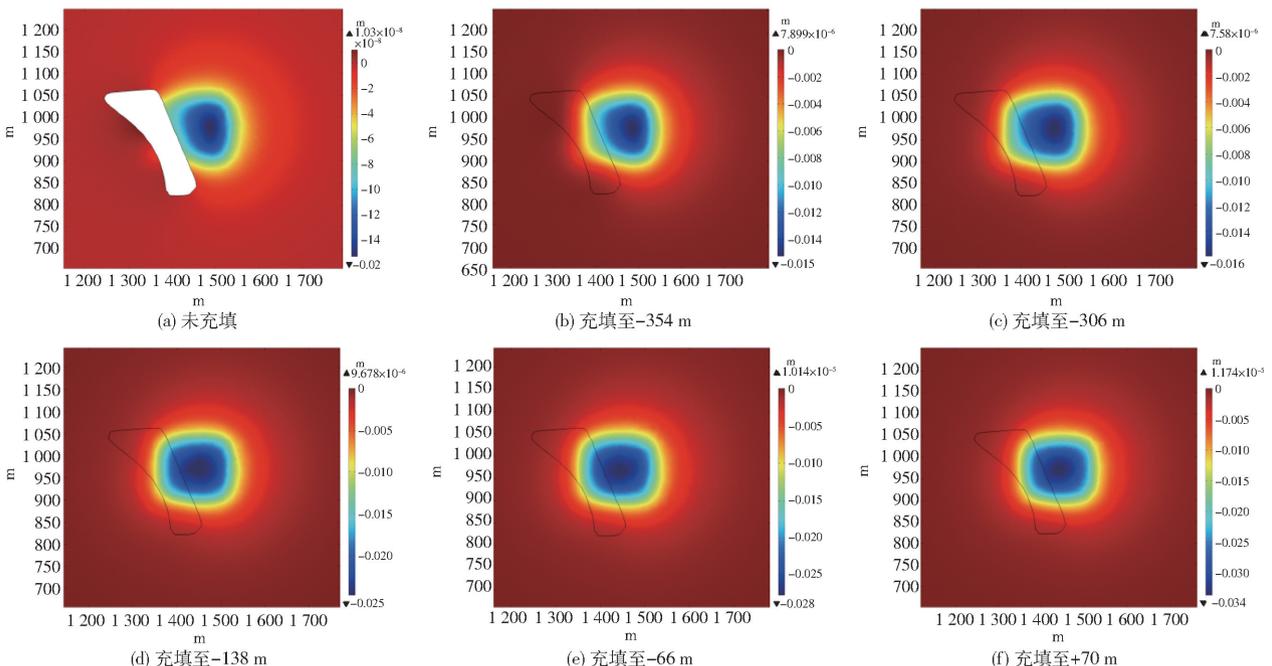


图 10 水平截面应力分布云图

沉,位移中心大致位于地下采场的正上方,在Z方向的位移上则表现为负向位移。相较于X和Y方向上的位移值,竖直方向Z上的位移值要显著高于水平方向。

对比不同充填高度下水平截面Z方向位移分布云图,可以发现各充填高度下的Z方向位移与未充填时的分布规律基本一致,主要的位移是由下方采场开挖所引起的,随着充填高度的提升下沉位移呈现增长趋势,这一趋势主要是采场上方充填体厚度增加所导致。总体而言下沉位移属于正常范围,对采场采取相关支护措施后可正常进行采矿作业,而封底结构的位移相对要更小,也不会造成封底结构的破坏。

## 5 结论

(1)从单轴抗压强度的测试结果可以看出,随着料浆浓度的增加,不同灰砂比各龄期的单轴抗压强度均有所增长。但料浆浓度较小时7 d、28 d单轴抗压强度增长较慢,而料浆浓度较大时(70%、72%),7 d、28 d单轴抗压强度增长较快。

(2)随着灰砂比的提高,即水泥掺量的增加,各组试件的抗压强度也会相应提升。当灰砂比小于1:15时,3 d、7 d、28 d的单轴抗压强度距离较近,胶结体试件抗压强度增长速度并不明显。当灰砂比较大(1:15以上),抗压强度增长速度显著。

(3)随着胶结体养护龄期的增加,胶结体内聚力显著增加。其中,相比于养护3 d时的变化幅度,养护7 d、28 d时的胶结体内聚力增加更为显著;随着灰砂比的增加,胶结体内摩擦角呈增大的趋势;而随着浓度的变化,内摩擦角的变化并无一致规律。

(4)进行矿坑充填治理过程中,随着充填高度的增加水平截面的应力最大值整体变化很小,而充填体所受应力变化相对较大,呈现出先降低后增长的趋势。而封底结构位移主要以竖直方向位移为主,随着充填高度的提升下沉位移呈现增长趋势,但总体而言下沉位移属于正常范围。

### [参考文献]

- [1] 黄天生,许新启,杨焕文. 铝土矿露天矿坑湿式回填工艺初探[J]. 有色金属, 1997(3): 2-5.
- [2] 宋子岭,贾兰,范军富,等. 深凹露天矿坑回填工艺[J]. 科技导报, 2012, 30(4): 51-54.
- [3] 董晓红,梁桂兰,许忠厚. 边坡稳定分析方法综述及发展趋势研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2012, 10(5): 100-102+106.
- [4] 舒继森,王文忠,张镛. 浅谈生产露天矿的边坡稳定性研究[J]. 露天采矿技术, 2005(5): 44-46.
- [5] 郑龙奎,宋新江. 强度折减有限元法边坡稳定分析研究综述[J]. 治淮, 2014(5): 24-25.
- [6] 王志高,杨素霞,谢金亮. 某铅锌矿废石尾矿固化/稳定化处理试验研究[J]. 有色冶金节能, 2019, 35(6): 51-56.
- [7] 闫方宝,王尚祯. 矿山充填采矿中胶凝材料的种类及应用[J]. 有色冶金节能, 2014, 30(1): 33-37.
- [8] 郑宏,刘德富. 弹塑性矩阵  $D_{(ep)}$  的特性和有限元边坡稳定性分析中的极限状态标准[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(7): 1099-1105.
- [9] 吴顺川,金爱兵,高永涛. 基于遍布节理模型的边坡稳定性强度折减法分析[J]. 岩土力学, 2006(4): 537-542.
- [10] 刘金,李勤昌,马秀媛. 有限元强度折减法在边坡稳定分析中的应用[J]. 山东大学学报(工学版), 2016, 46(4): 83-88.