

某矿充填体合理强度研究

李再易¹, 尹丽冰¹, 孙远江², 龚永超², 陆锦涛², 周礼²

(1. 新疆瑞伦矿业有限责任公司, 新疆 哈密市 839000;

2. 长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012)

摘要:针对高大采场高度高和暴露面积大的特点,在保证采场安全的基础上,为降低充填成本,采用理论计算、工程类比和数值模拟相结合的方法确定充填体合理强度。为减少爆破对充填体的破坏,采用 Mathews 稳定图法确定采场充填体侧帮暴露面积,并根据成功工程实例推荐护壁厚度。研究结果表明,当矿房高度为 36 m 时,充填体 28 d 强度从上到下分别为 1.85 MPa、1.5 MPa 和 1.85 MPa;当矿房高度为 60 m 时,充填体的强度分别为 2.45 MPa、1.8 MPa、2.0 MPa、2.2 MPa 和 2.45 MPa;当矿房高度为 72 m 时,充填体的强度分别为 2.8 MPa、2.0 MPa、2.2 MPa、2.4 MPa 和 2.8 MPa;二步骤采场充填体强度为 0.6 MPa;当炮孔孔径为 165 mm 时,护壁厚度为 2.2~2.5 m;当炮孔孔径为 120 mm 时,护壁厚度为 1.5~1.8 m。

关键词:充填体;抗压强度;护壁厚度;高大采场;数值模拟

0 引言

充填采矿法作为一种重要的矿山开采方法,近年来得到了广泛的应用^[1-5]。充填采矿法通过将废弃物和尾矿等固体废料回填到采空区,形成稳定的充填体支撑和稳定采场,从而实现安全高效的矿山开采。在充填采矿过程中,充填体的合理强度是确保采场稳定性和矿山安全生产的关键因素,特别是在两步骤回采中,合理控制充填体的强度是确保二步骤矿石资源得到有效回采的关键因素,需要充填体具备足够的强度来抵抗第二步骤回采时围岩体产生的应力变化和变形,从而保障采场的稳定性和回采安全。因此,对于两步骤回采中充填体合理强度的研究显得尤为重要。对于充填体强度的计算,国内已有大量研究,李德贤等^[6]量化分析了采空区内充填体临界强度及固化时间的合理范围,通过定量分析确定某矿山一步骤采空区充填体的临界强度为 1.9 MPa,固化时间 26 d 后,方可进行二步骤矿体回采。吴大玮^[7]通过 FLAC3D 研究不同强度充填体在各步骤回采过程中的受力及破坏情况,确定了距离采场顶底板各 10 m 内充填体强度为 1.5 MPa,而中部为 1.0 MPa,该方案具有充填体稳定、破坏最

小、经济合理的特点。周华林^[3]通过 FLAC3D 对不同高度上不同充填体强度下,顶板、底板和矿柱稳定性进行了分析,得到了充填体合理强度分布情况。张兴前等^[9]采用理论计算与数值模拟两种方法确定了挑水河磷矿的充填体强度。王旭锋等^[10]提出采用高泡材料进行顶部充填,以减少材料用量和优化支护效果。朱志彬等^[11]采用类比法、模型法等充填体强度计算方法,计算了充填体保持稳定的强度。曾凌方等^[12]通过 FLAC3D 对采场充填体强度进行了优化。王作鹏等^[13]基于主成分分析法,根据数值模拟获得的不同矿柱宽度和充填体强度下矿柱最大压应力和剪应力、位移及塑性区占比,构建矿柱稳定性综合评价指标,并以矿柱稳定和经济效益最优为目标,最终确定矿柱宽度和充填体强度。

本文根据以往研究成果及实践经验,以某矿为工程研究背景,采用理论计算、工程类比和数值模拟相结合的方式,研究了充填体强度在高度上的分布规律,确定充填体合理强度,并推荐了护壁厚度,为类似矿山充填提供参考依据。

1 工程背景

某矿初步设计采用空场采矿法开采,采矿方法

* 收稿日期: 2023-08-07

作者简介: 李再易(1988—),云南宣威人,工程师,主要从事采矿技术工作,E-mail:506368388@qq.com。

通信作者: 孙远江(1996—),男,河南濮阳人,助理工程师,主要从事金属矿山开采技术,E-mail:1300260025@qq.com。

以无底柱分段崩落法为主,部分矿段采用分段空场采矿法和浅孔留矿采矿法^[14-16]。但由于近年来矿区被市政府纳入生态林保护区,出于环保的需要,矿山决定自200 m中段以下改为充填采矿法。变更后的充填采矿法依据矿体的赋存条件和分布状态,细分为4种:分段矿房阶段充填采矿法;分段凿岩阶段矿房充填采矿法;盘区分段矿房阶段充填采矿法;盘区大直径深孔阶段矿房充填采矿法。充填采场中,矿房宽(一步骤与二步骤)分别为20 m、20 m,矿房高度分别为36 m、60 m、72 m,采场长度为90 m。

2 充填体合理强度确定

2.1 充填体强度理论计算

国内外的采矿科技工作者对确定胶结充填体强度提出了很多理论计算方法,本文选取了托马斯(Thomas)模型法、太沙基(Terzaghi)模型法、米切尔(Mitchell)算法、覆岩承重计算法和蔡嗣经经验公式法共5种理论计算方法,对某矿井下矿房充填体的应力情况进行计算,各种方法的计算结果见表1及图1。由表1及图1可知,不同理论方法计算的充填体应力变化规律相似,随着矿房高度的增加,充填体应力几乎呈线性增长,且除覆岩承重计算法外,其他方法的计算结果增长速度几乎相同;同一矿房高度时,各种理论方法计算结果相差不大,平均相差

0.346 MPa。

2.2 充填体强度类比

类比法是一种简单实用的方法,它通过对比类似的工程实例来推导充填体的强度参数^[17-20]。不同矿山由于开采技术条件不同,类比法并不完全适用,但可以初步估算充填体强度,而且这种方法简单快捷,不需要复杂的数学模型和大量的数据。通过类比法分析类似矿山充填情况,结果见表2,由表2可知,李楼-吴集铁矿矿房高度为100 m,一步骤充填强度设计要求为 $R_{28} \geq 3.0$ MPa,实际灰砂比为1:4的井下充填体单轴抗压强度为8.07 MPa,采场充填体未曾出现大范围的垮塌现象;安庆铜矿矿房高度为115 m,实际充填体强度为0.12~3.58 MPa,其中强度小于1.25 MPa的试样占总数的89.3%,强度范围在0.50~1.00 MPa间的试样占总数的70.7%,后期由于充填质量控制不严,出现部分垮塌现象;冬瓜山铜矿矿房高度为46~83 m,灰砂比为1:4的充填体60 d的试块强度为2.04~3.66 MPa,基本上未出现坍塌现象。

通过分析以上三个具有类似条件矿山的实际应用案例及效果来看,充填体强度变化范围为0.12~3.58 MPa,结合本矿山实际条件,认为当矿房高度为72 m时,一步骤采场胶结充填体底部的的设计强度 $R_{28} \geq 2.8$ MPa是可以满足要求的。

表1 不同矿房高度下充填体应力

矿房高度 H/m	应力/MPa				
	Thomas 模型法 ($k=2.0$)	Terzaghi 模型法 ($k=2.0$)	Mitchell 算法 ($k=2.0$)	覆岩承重计算法 ($k=1.5$)	蔡嗣经经验公式法 ($k=1.2$)
18	0.634	0.566	0.844	0.513	0.704
36	1.086	1.070	1.380	1.026	1.308
54	1.424	1.514	1.752	1.538	1.715
60	1.52	1.652	1.852	1.709	1.840
72	1.688	1.910	2.026	2.051	2.077

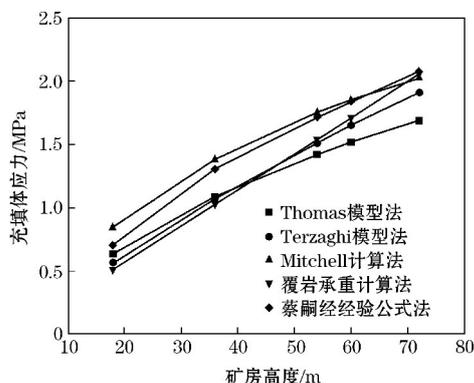


图1 不同矿房高度下充填体应力

2.3 数值模拟

2.3.1 模型构建

根据某矿实际矿房尺寸,利用三维数值仿真软件3D- σ 软件建立采场的数值计算模型,本次模拟矿房高度分别为36 m、60 m、72 m的3种方案,矿房长度为90 m,宽度为20 m,模型各岩层力学参数采用现场所取岩块经实验室力学试验测得的数据,并通过数值模拟进行参数校正。同时考虑计算机模拟速度及结果的精度,充填体采用20节点的高精度等参单元离散模型网格。材料破坏服从Drucker-prager塑性屈服准则。

表 2 类似矿山充填情况

矿山名称	采场结构参数	充填特性及充填体强度情况
李楼— 吴集铁矿	设计长度为矿体厚度,最大厚度达到 80 m,高度为 100 m。	一步骤采场胶结充填体底部的设计强度要求 $R_{28} \geq 3.0$ MPa;二步骤采场充填体的设计强度要求 $R_{28} \geq 0.8$ MPa。采用尾砂胶结充填,现场使用的充填体灰砂比有 1:4、1:6、1:8、1:10、1:12 等。井下充填半年后对现场充填体进行了钻孔取样,并在实验室进行了抗压强度测试,测试结果是:灰砂比为 1:4 的井下充填体的单轴抗压强度平均为 8.07 MPa;灰砂比为 1:6 的充填体的单轴抗压强度为 3.34 MPa;灰砂比为 1:8 的充填体的单轴抗压强度为 2.45 MPa。李楼—吴集铁矿使用阶段空场嗣后充填采矿法已有 5 a,从充填体的揭露情况来看,现场充填体是稳固的,采场充填体未曾出现大范围的跨塌现象。
安庆铜矿	设计长度为 70 m,宽度为 15 m,高度为 115 m。	采场充填体经过钻孔取样,测定了充填体强度,充填体强度变化范围为 0.12~3.58 MPa,其中强度小于 1.25 MPa 的试样占总数的 89.3%;强度范围在 0.50~1.0 MPa 间的试样占总数的 70.7%。安庆铜矿前期基本上没有产生过坍塌,但局部有片帮,增加了贫化;后期由于充填质量控制不严,出现了充填体强度降低的现象,致使高大采场的充填体出现部分垮塌现象。
冬瓜山铜矿	设计长度为 82 m,宽度为 18 m,高度为矿体厚度,为 46~83 m 不等。	灰砂比为 1:4 的充填体,60 d 的试块强度为 2.04~3.66 MPa;灰砂比为 1:6 时,60 d 的试块强度为 1.46~1.67 MPa;灰砂比为 1:8 时,60 d 的试块强度为 0.76~0.98 MPa;灰砂比为 1:12 时,60 d 的试块强度为 0.52~0.63 MPa。冬瓜山铜矿高大采场的充填体稳定性较好,基本上未出现坍塌。

2.3.2 模拟分析结果

图 2、图 3 分别为不同矿房高度(36 m、60 m、72 m)下,不同剖面的最大主应力等值线。由图 2、图 3 可知,当矿房高度为 36 m 时,最大主应力范围均为 $-1.068 \sim -0.290$ MPa;当矿房高度为 60 m 时,最大主应力范围均为 $-1.721 \sim -0.436$ MPa;当

矿房高度为 72 m 时,最大主应力范围均为 $-2.058 \sim -0.519$ MPa。矿房高度相同时,随矿房高度增加,压应力逐渐减小,充填体底部压应力最大,且在充填体下部表现出成拱效应;矿房高度不同时,随矿房高度增加,最大主应力逐渐增加,矿房高度为 36 m 时,充填体内最大压应力为 1.068 MPa,矿房

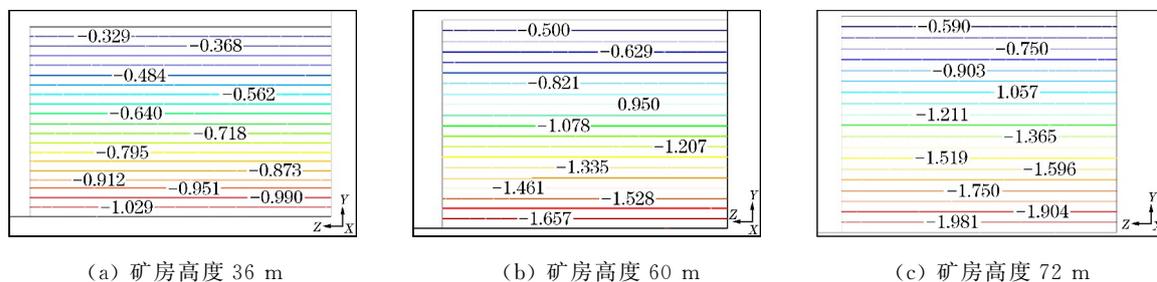


图 2 最大主应力等值线(剖面沿采场长轴方向过短轴的中央)

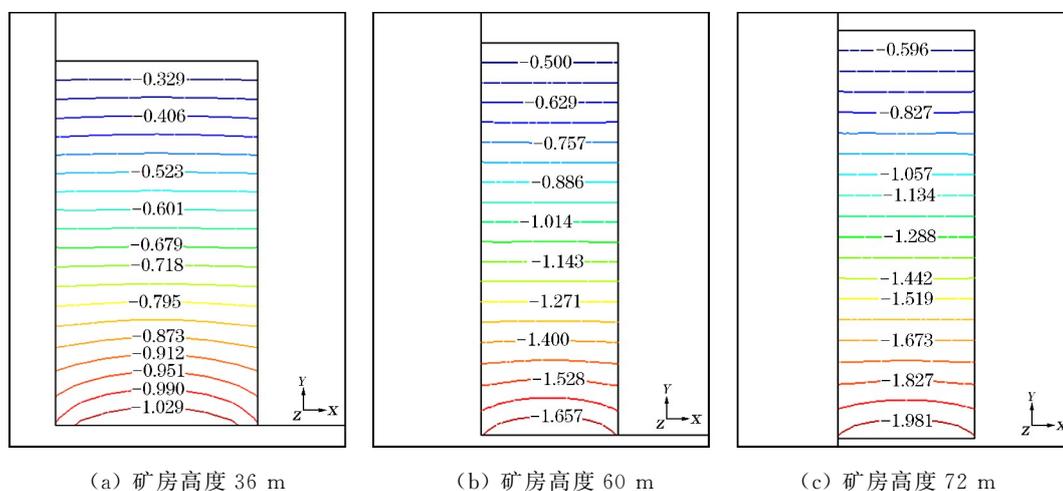


图 3 最大主应力等值线(剖面沿采场短轴方向过长轴的中央)

高度为 72 m 时,充填体内最大压应力为 1.721 MPa,矿房高度为 72 m 时,充填体内最大压应力为 2.058 MPa。

图 4 为不同矿房高度下,y 轴方向位移等值线。由图 4 可知,当矿房高度为 36 m 时,y 轴方向位移范围为-0.037~0 m;当矿房高度为 60 m 时,y 轴方向位移范围为-0.098~0 m;当矿房高度为 72 m 时,y 轴方向位移范围为-0.140~0 m。矿房高度相同时,随矿房高度增加,位移逐渐增大,充填体顶部位移最大;矿房高度不同时,随矿房高度增加,y 轴方向位移逐渐增加,矿房高度为 72 m 时,充填体位移达到 0.140 m,是矿房高度 36 m 的充填体位移的 3.8 倍。

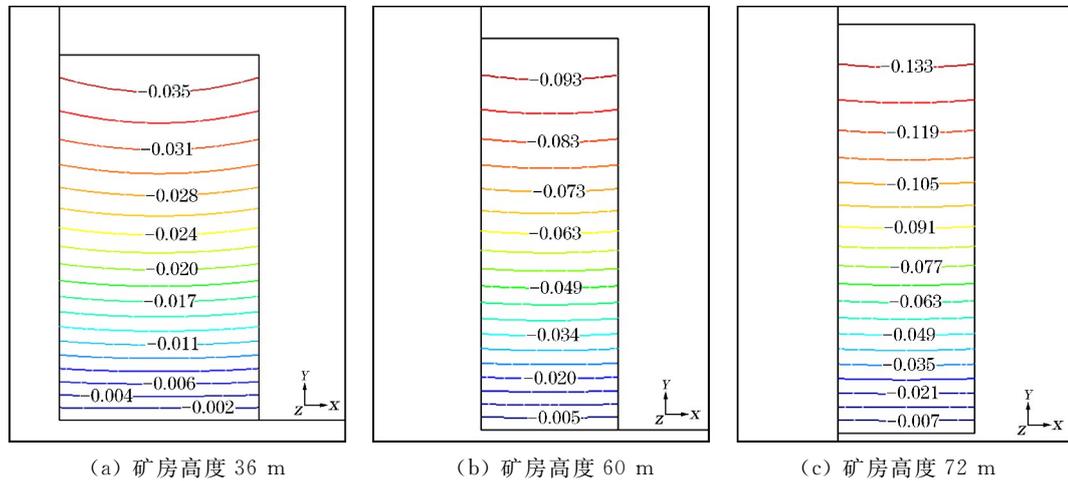


图 4 y 轴方向位移等值线

表 3 一步骤 20 m 宽矿房底部充填体强度推荐值

矿房高度 H/m	充填体强度推荐值 R_{28} /MPa
36	≥ 1.85
60	≥ 2.45
72	≥ 2.80

表 4 矿房高度为 36 m 时充填体强度推荐值

距充填体顶面的高度 H/m	充填体强度推荐值 R_{28} /MPa	
	一步骤充填体	二步骤充填体
0~4	≥ 1.85	≥ 1.85
4~28	≥ 1.50	≥ 0.60
28~36	≥ 1.85	≥ 1.85

2.8 MPa、2.0 MPa、2.2 MPa、2.4 MPa。二步骤采场充填体一般采用低强度的胶结充填体即可,取 $R_{28} \geq 0.6$ MPa。

2.4 充填体合理强度

根据前几节所述,通过采用公式法、类比法及数值模拟 3 种方法最终确定一步骤充填体底部所需要的强度推荐值见表 3。由表 3 可知,矿房高度为 36 m 时, $R_{28} \geq 1.85$ MPa;矿房高度为 60 m 时, $R_{28} \geq 2.45$ MPa;矿房高度为 72 m 时, $R_{28} \geq 2.80$ MPa。同时,为了进一步降低充填成本,对充填体不同高度的强度进行进一步细化,结果见表 4、表 5、表 6。当矿房高度为 36 m 时,其顶、底部各 4 m 厚的范围内仍然要求充填体的强度 $R_{28} \geq 1.85$ MPa,中间强度为 $R_{28} \geq 1.5$ MPa;当矿房高度为 60 m 时,充填体的强度分为 2.45 MPa、1.8 MPa、2.0 MPa、2.2 MPa;当矿房高度为 72 m 时,充填体的强度分为

表 5 矿房高度为 60 m 时充填体强度推荐值

距充填体顶面的高度 H/m	充填体强度推荐值 R_{28} /MPa	
	一步骤充填体	二步骤充填体
0~6	≥ 2.45	≥ 2.45
6~22	≥ 1.80	≥ 2.45
22~36	≥ 2.00	≥ 0.60
36~48	≥ 2.20	≥ 0.60
48~52	≥ 2.45	≥ 2.45
52~60	≥ 2.45	≥ 2.45

2.5 充填体合理暴露面积及护壁合理厚度

二步骤回采时,采场一边或者两边为充填体,为了保证充填体在整个采场回采过程中保持稳定和减少爆破的破坏作用,同时保证良好的爆破效果,关键是要确定充填体合理暴露面积及合理的矿壁厚度(孔边距)。一步骤充填体暴露侧面积最大

达 6480 m²,为了验证充填体能否自稳,本文采用 Mathews 稳定图法,确定采场充填体侧帮暴露面积,结果见表 7。由表 7 可知,3 种矿房高度下,充填体强度能够满足自稳条件。对于护壁厚度目前还没有非常完善的理论系统可对其进行定量分析,结合国内外应用成功的工程实例,边孔距充填体 1.5~2.5 m 为宜,结果见表 8。因此本矿护壁厚度推荐为当孔径为 165 mm 时,护壁厚度为 2.2~2.5 m;当孔径为 120 mm 时,护壁厚度为 1.5~1.8 m。

表 6 矿房高度为 72 m 时充填体强度推荐值

距充填体顶面的高度 H/m	充填体强度推荐值 R_{28}/MPa	
	一步充填体	二步充填体
0~6	≥ 2.8	≥ 2.8
6~26	≥ 2.0	≥ 2.8
26~42	≥ 2.2	≥ 0.6
42~57	≥ 2.4	≥ 0.6
57~64	≥ 2.8	≥ 2.8
64~72	≥ 0.6	≥ 2.8

表 7 Mathews 稳定图法计算的充填体侧帮暴露面积

充填体强度 R_{28}/MPa	形状因子 S/m	暴露面积/ m^2
1.85	14.8	3958
2.45	19.4	6126
2.80	27.9	7280

表 8 不同矿山护壁厚度

矿山名称	炮孔直径/mm	护壁厚度/m
凡口铅锌矿	165	2.5
铜陵有色安庆铜矿	165	2.2
中金岭南广西盘龙铅锌矿	110	1.5
李楼铁矿	80	1.0
图拉尔根铜镍矿	120	2.0

3 工程实践

二步骤回采时,一步充填体稳定性良好,未出现大面积垮塌现象,表明充填体质量能够满足井下矿体回采技术要求,实现了矿井安全生产。现场试验结果如图 5 所示。

4 结论

(1) 不同理论方法计算的充填体应力变化规律相似,随矿房高度的增加,充填体强度几乎呈线性增长,且除覆岩承重计算法外,其他计算方法计算

结果增长速度几乎相同;同一矿房高度时,各种理论方法计算结果相差不大,平均相差 0.346 MPa。



图 5 一步充填体侧帮现状图

(2) 矿房高度相同时,随矿房高度的增加,压应力逐渐减小,充填体底部压应力最大,且在充填体下部表现出成拱效应;矿房高度不同时,随矿房高度增加,最大主应力逐渐增加。

(3) 采用公式法、类比法及数值模拟 3 种方法最终确定了一步充填体底部所需要的强度。当矿房高度为 36 m 时,充填体强度分别为 1.85 MPa 和 1.5 MPa;当矿房高度为 60 m 时,充填体的强度分别为 2.45 MPa、1.8 MPa、2.0 MPa、2.2 MPa;当矿房高度为 72 m 时,充填体的强度分别为 2.8 MPa、2.0 MPa、2.2 MPa、2.4 MPa。二步骤采场充填体一般采用低强度的胶结充填体即可,取 $R_{28} \geq 0.6$ MPa。

(4) 采用 Mathews 稳定图法确定 3 种不同矿房高度下,充填体强度能够满足自稳条件。研究结果表明,当孔径为 165 mm 时,护壁厚度为 2.2~2.5 m;当孔径为 120 mm 时,护壁厚度为 1.5~1.8 m。

参考文献:

- [1] 秦豫辉,田朝晖.我国地下矿山开采技术综述及展望[J].采矿技术,2008(2):1-2+34.
- [2] 郭利杰,刘光生,马青海,等.金属矿山充填采矿技术应用研究进展[J].煤炭学报,2022,47(12):4182-4200.
- [3] 孟元.充填采矿法在矿山井下开采中的应用研究[J].世界有色金属,2021(9):135-136.
- [4] 杨清平,王贻明,刘晓辉,等.谦比希铜矿下向深孔爆破分段嗣后充填采矿法试验与应用[J].中国有色金属,2023(增刊 1):247-250.
- [5] 龙晶晶,赵丽军,杨会选,等.分段空场嗣后充填采矿法在厂坝李家沟采区的应用[J].甘肃冶金,2023,45(1):12-15.
- [6] 李德贤,赵国亮,张鹏强,等.尾砂胶结充填体的强度特性及与开挖矿体的合理匹配[J].有色金属(矿山部分),2021,73(6):86-92.

- [7] 吴大玮. 图拉尔根铜镍矿充填体合理强度确定[J]. 新疆有色金属, 2016, 39(1): 11-13.
- [8] 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.
- [9] 张兴前, 胡建华, 柳勇, 等. 挑水河磷矿胶结充填体强度需求研究[J]. 黄金, 2023, 44(5): 21-23+27.
- [10] 王旭锋, 贾俊飞, 杨战标, 等. 极松软厚煤层超高巷道顶部高泡材料充填体强度确定[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2023, 5(4): 77-87.
- [11] 朱志彬, 刘成平. 充填体强度计算及稳定性分析[J]. 采矿技术, 2008(3): 15-17+25.
- [12] 曾凌方, 程东旭, 高宏波. 采场充填体强度数值模拟优化分析[J]. 采矿技术, 2020, 20(3): 37-41.
- [13] 王作鹏, 金爱兵, 庞如顺, 等. 基于主成分分析法的嗣后充填采场矿柱及充填体强度研究[J]. 矿业研究与开发, 2023, 43(3): 45-52.
- [14] 王雄荣, 赵本山, 梁巨理, 等. 某铜矿空场法转充填法采矿方法优化研究[J]. 采矿技术, 2022, 22(6): 158-160.
- [15] 史群辉, 罗佳, 闫宇, 等. 某金矿空场法转充填采矿方案研究与实践[J]. 采矿技术, 2021, 21(3): 9-11+17.
- [16] 赵晓昕, 何艳梅, 汤永平, 等. 某钨矿开采由崩落法转充填法的经济合理性分析[J]. 采矿技术, 2018, 18(5): 12-14.
- [17] 曾令义. 低品位倾斜中厚矿体充填采矿法优选[J]. 黄金, 2023, 44(2): 22-26.
- [18] 邱洋洋, 王元民, 由松江, 等. 嵩县山金急倾斜中厚矿体开采方法研究与应用[J]. 黄金, 2023, 44(1): 28-32.
- [19] 史群辉, 罗佳, 闫宇, 等. 某金矿空场法转充填采矿方案研究与实践[J]. 采矿技术, 2021, 21(3): 9-11+17.
- [20] 赵兴东, 黄雪松, 关强兵, 等. 阶段空场嗣后充填采矿法回采工艺应用研究[J]. 采矿技术, 2020, 20(6): 1-3+16.