



移动扫码阅读

赵红泽,邵志奔,杜海瑞,等.露天矿背斜区内排土场边坡基底处理方式优选研究[J].煤炭科学技术,2021,49(2):77-84. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.02.010

ZHAO Hongze, SHAO Zhiben, DU Hairui, et al. Study on optimization of treatment methods for inclined basement of inner dump slope in anticline area of open-pit mine[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(2): 77-84. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2021.02.010

露天矿背斜区内排土场边坡基底处理方式优选研究

赵红泽^{1,2}, 邵志奔¹, 杜海瑞¹, 邓有燃³

(1.中国矿业大学(北京)能源与矿业学院,北京 100083;2.中国矿业大学(北京)深部岩石力学与地下工程国家重点实验室,北京 100083;3.中煤平朔集团有限公司 安家岭露天矿,山西 朔州 036006)

摘 要:露天矿内排土场边坡的稳定是露天矿顺利生产的重要保障,而排土场基底的岩层赋存条件是影响排土场边坡稳定性的重要因素。安家岭露天矿开采进入背斜影响区,现有内排空间无法满足排土需求,需要在背斜区进行排土。为解决露天矿背斜倾角较大区域倾斜基底排土场稳定性问题,以安家岭露天矿内排土场为研究对象,提出了针对背斜区倾斜基底进行处理的 3 个方案:基底麻面爆破处理,跟踪排弃台阶坡脚处拉抗滑沟处理以及背斜区倾角 12°位置留设抗滑煤柱;使用 Geo-studio 软件 Morgenstern-Price 法研究在不同基底处理方式下进行背斜区单台阶跟踪排土,排土台阶的滑移模式以及稳定性变化情况。通过计算各个方案的经济成本,跟踪排土台阶稳定性系数以及背斜区域的单位排土量,构建了成本、稳定性系数、排土量 3 个评价指标,采用基于熵权 TOPSIS 法对所选指标进行加权,并根据方案与理想解的贴近度大小确定基底处理的最佳方案。研究结果表明:背斜区单排土台阶滑移模式为以排弃台阶坡顶至排弃物料内部的圆弧滑面为侧滑面,以沿着基底平面为底部滑面的切层-顺层滑动;相同排弃参数的排弃台阶,在基底坡度从陡变缓的过渡区域,排土台阶的基底平面接近于圆弧面,且单台阶排弃量增加,台阶稳定性发生突变,安全系数较上部台阶显著降低;通过基于熵权 TOPSIS 法对 3 个方案进行优选,确定麻面爆破方案为基底处理的最优方案。

关键词:倾斜基底;基底处理;方案优选;露天煤矿

中图分类号:TD849

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2021)02-0077-09

Study on optimization of treatment methods for inclined basement of inner dump slope in anticline area of open-pit mine

ZHAO Hongze^{1,2}, SHAO Zhiben¹, DU Hairui¹, DENG Youran³

(1.School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining & Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 2.State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 3.Anjialing Surface Mine, China Coal Pingshuo Group Co., Ltd., Shuozhou 036006, China)

Abstract: The stability of the side slope of the dump in the open-pit mine is an important guarantee for the smooth production of open-pit mine, and the rock formation conditions at the base of the dump is an important factor affecting the stability of the dump. As Anjialing Open-pit Mine access into the anticline area, the existing internal drainage space couldn't meet the demand of dumping, so it needs to dump in the anticline area. In order to solve the stability problem of dump overlying the bedrock with large dip angle in Open-pit Mine, taking the internal dumping of the Anjialing Open-pit Mine as the research object, three methods for dealing with the inclined basement in the anticline area were proposed: the blasting treatment on the pockmarked surface of the basement, anti-sliding ditch excavation treatment at the foot of the track dumping step slope, anti-sliding coal pillars at the 12° dip in the anticline area. The Geo-studio software Morgenstern-price method was used to study the slip mode and stability changes of the dumping bench when the single-step tracking dump in the anticline area was performed under different substrate treatment methods. By calculating the economic cost of each plan, tracking the stability

收稿日期:2020-12-20;责任编辑:曾康生

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFC0808301);中国矿业大学(北京)深部岩石力学与地下工程国家重点实验室开放基金资助项目(SKLGDEK1923)

作者简介:赵红泽(1978—),男,山西河津人,副教授,博士。E-mail: hzzhao78@163.com

coefficient of the dumping bench and the unit dumping volume in the anticline area, three evaluation indicators of cost index, stability coefficient index and dumping volume index were constructed, the entropy-based TOPSIS method was used to weight the selected indicators, and the best plan for substrate processing was determined according to the degree of closeness between the plan and the ideal solution. The results of the study show that: the slip pattern of the single-dumped soil steps in the anticline area is that the arc sliding surface from the top of the dumping step slope to the inside of the dumping material is the side sliding surface, and the base plane is the bottom sliding surface these two sliding surfaces causes the cut-to-layer sliding; for the dumping steps with the same dumping parameters, in the transition area where the base slope changes from steep to gentle, the base plane of the dumping steps is close to the arc surface, and the single-step dumping volume increased, the stability of the steps changes suddenly and the safety factor is significantly lower than that of the upper steps; the three schemes are optimized through the entropy-based TOPSIS method, and the pockmarked blasting scheme is determined as the optimal scheme for substrate treatment.

Key words: inclined basement; basement treatment; method optimization; open-pit coal mine

0 引言

露天矿边坡稳定性是关系到露天矿安全生产的重要问题。露天矿边坡包括露天矿采场端帮边坡^[1-2]以及露天矿排土场边坡。在露天矿进行内排时,排土场边坡的稳定性不仅影响排土的正常进行,更对其下方工作面的正常生产有着重要的影响。国内外对于露天矿排土场边坡稳定性有着大量的研究,包括软弱基底排土场边坡^[3],倾斜基底排土场边坡^[4]以及软弱倾斜复合基底排土场边坡^[5]稳定性等。针对于倾斜基底排土场稳定性的研究手段主要包括利用数值模拟以及相似模拟试验等。其中宋子岭等^[6]通过FLAC^{3D}研究得出了内排土场边坡受到倾斜基底的影响其稳定性随平盘宽度的增加呈近线性增加^[6]。舒继森等^[7]提出了排土场加强排水,采用合适的排土参数等边坡失稳防治措施。陈冲等^[8]通过底摩擦实验揭示了基底在天然状态以及饱水状态下的排土场边坡滑移特征。曹兰柱等^[9]人通过刚体极限平衡分析法探讨了软弱倾斜复合基底排土场的失稳机理。

目前国内外针对露天矿的倾斜煤层开采^[10]以及倾斜基底内排土场的失稳防治方式都一定的研究。在排土场治理方面,提出的处理方法主要为削方减载,排土压脚等措施^[11-14],以及在基底打抗滑桩,基底麻面爆破,拉抗滑沟,基底松软岩层清理等^[15-17]。对于不同矿区的内排土场来说,需要采用不同的治理方式。一般针对露天矿进行方案优选的研究主要集中在露天矿的生产运营环节,而露天矿边坡治理方面的优选研究较少。目前国内外的方案优选方法主要有模糊综合评价法,基于熵权-TOPSIS法等^[18-19]。其中,黄国权等^[20]基于熵权法对露天矿坑排水进行了系统优化^[20]。刘洋等^[21]以及邓红卫等^[22]分别利用组合赋权法进行了采矿方法的优选。韩新平等^[23]利用层次分析法对爆破方案进行模糊综合评价。笔者通过构建倾斜基底不同

处理方案的3个评价指标,并对稳定性系数指标进行量化,结合基于熵权TOPSIS法对方案进行优选研究,为同类型露天矿排土场的治理方案的优选供了借鉴。

1 工程概况

安家岭露天矿开采进入背斜区如图1所示,随着工作面继续向东推进,剥离物排弃至芦子沟背斜西翼时,运距过远,提升高度过大,而在背斜区进行排弃可显著降低成本。在背斜影响区,煤层倾角急剧增大,煤层平均倾角达到 $8^{\circ} \sim 12^{\circ}$,局部最大倾角为 22° ,煤层落差达到270多m,地表和基岩面下降50~100 m,倾角变大地段长1 200~2 100 m。现有内排土场排土台阶高度为25 m宽度为60 m,台阶自然安息角为 35° ,排土场基底上部为11煤厚度为4 m,11煤上部为9煤底板,其厚度为4 m。11煤,其底板岩层以砂泥互层为主,表面岩层为砂岩,厚度10 m。在现状背斜倾角较大区域进行内排,保证边坡稳定情况下可排弃量有限,因此必须研究基底处理措施以增加排土量。

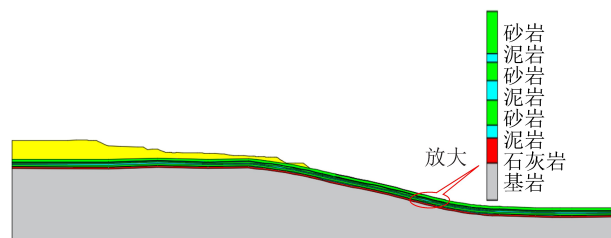


图1 安家岭露天矿现状内排土场剖面

Fig.1 Current inner dump profile in Anjialing Open-pit Mine

2 倾斜底板处理方案及排土场稳定性分析

2.1 基底处理方案设计

根据国内外已有的基底处理方式,结合安家岭露天矿现场生产情况,提出针对倾斜基底上排土的基底处理方案。考虑基底打抗滑桩,留设抗滑挡土墙在施工上的不便利,易影响露天矿生产。因此针

对排土场沿基底下滑的问题,提出了3个基底处理方案:基底麻面爆破处理;跟踪排弃台阶坡脚处拉抗滑沟处理;背斜区倾角 12° 位置留设抗滑煤柱。

1) 基底麻面爆破处理。麻面爆破的主要作用为在基底表面形成破碎带,凹凸不平的表面增大了上部滑体与下部基底之间的摩擦阻力。麻面爆破可分为大麻面爆破以及小麻面爆破。其中大麻面爆破是将需要麻面爆破的弱层或者基底与上覆的岩层或煤层一同爆破,将煤岩剥离后在弱层或底板形成麻面。小麻面爆破是将爆破钻孔直接打到需麻面爆破的弱层或基底上,仅在弱层以及基底局部装药,进行爆破,并尽量避免上覆岩层或排土场的破坏。根据安家岭露天矿生产现状,由于在生产过程中底板上覆11煤的开采也需要进行爆破处理,因此整体采用大麻面爆破,在爆破11煤时,利用钻孔超深对11煤底板进行麻面爆破处理,为防煤矸混合,在底板与煤层间分段装药,在煤岩接触面不装药。为确保每排麻面爆破漏斗能够联通,在每2个炮孔间增加1个小麻面爆破炮孔,此炮孔仅在基底处装药。

安家岭露天矿台阶爆破孔网参数排距为8 m。设计麻面爆破深度为2 m,爆破作用指数为1,可得出爆破漏斗半径为2 m,通过2个爆破漏斗半径与炮孔排距,可得出排土剖面的2个爆破漏斗间的岩柱长为4 m,如图2所示。

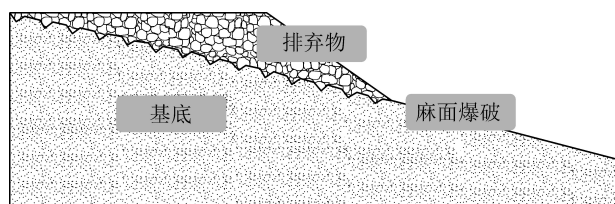


图2 基底麻面爆破处理示意

Fig.2 Schematic of blasting of pitted surface

2) 跟踪排弃台阶坡脚处拉抗滑沟处理。基底拉抗滑沟处理在路基的基底处理中较为常见,一般采用深2~10 m、宽度为2~4 m的沟槽,留设抗滑沟的作用主要包括在降雨时起到排水的效果,以及在排土台阶沿基底滑移时,增大上部排土场的抗滑力。

由于排土场的高度以及宽度均远大于路基,针对排土场的基底拉沟处理,设计的抗滑沟尺寸要大些,考虑到爆破施工等方面因素,设计抗滑沟形状为梯形,宽度8 m、高度4 m。由于倾斜基底处理主要防止排土场边坡沿基底的滑动,当排弃台阶处于极限平衡状态时,排土场坡脚处往往出现应力集中现象。因此将留设抗滑沟的位置设置在排土台阶坡脚处。抗滑沟的施工采用爆破掏槽技术,采用爆破拉沟的方法不仅施工方便,并且成本较低,拉抗滑沟处

理如图3所示。

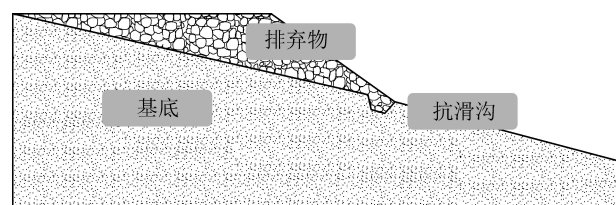


图3 跟踪排弃台阶坡脚处拉抗滑沟处理示意

Fig.3 Schematic of anti-sliding trench excavation at foot of track dump

3) 背斜区倾角 12° 位置留设抗滑煤柱。抗滑煤柱的留设其效果类似于抗滑挡土墙,其主要作用通过抗滑煤柱的支挡作用增大煤柱上部排土场的抗滑力,从而提高排土场的稳定性。背斜区排弃台阶的设计采用单台阶跟踪排弃的方式,上部与下部台阶之间未采用压坡脚的方式,是相互独立的台阶,以避免各个排弃台阶相互影响。留设抗滑煤柱对煤柱上部的台阶起到直接支撑作用,对背斜区煤柱以上台阶滑坡危害起到控制作用,避免因单个台阶滑动影响整个背斜区排土台阶。根据相关规范,在留煤柱的同时降低排土台阶高度,以提高各单排土台阶的稳定性,进而保证倾斜基底内排土场整体稳定性。

抗滑煤柱的留设方法为在9煤工作面采过后,11煤及其顶板9煤—11煤间夹层留设足够宽的不采动段,即抗滑煤柱,在抗滑煤柱上按照排土台阶参数进行排土。由于11煤高度为4 m,上覆9煤—11煤间夹层厚度4 m左右,因此确定留设煤岩柱高度为8 m,在 12° 区域留设三角形煤柱,通过几何尺寸可得出煤岩柱宽度为38 m,优化原台阶高度参数至23 m。留设抗滑煤柱如图4所示。

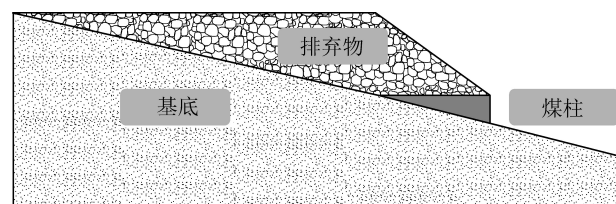


图4 背斜区倾角 12° 位置留设抗滑煤柱示意

Fig.4 Schematic of anti-slip coal pillars at 12° dip in anticline area

2.2 基底处理后排土场边坡稳定性分析

1) 边坡计算模型及参数选择。排土场边坡稳定性计算采用Geo-Studio软件Morgenstern-Price法确定每个跟踪排土台阶的稳定性系数以及滑移模式,滑移面的确定使用进入和退出的方法。

分别分析各方案中西排土场在现状排弃台阶的基础上,排土场向前发展过程中跟踪排弃台阶的稳定性。前2种方案设计排土台阶高度为现状内排高

度 25 m。第 3 种方案设计排土台阶高度为 23 m,留煤柱位于基底倾角最大处 12°线的位置,即将煤柱位置放置于第 3 个排弃台阶坡脚处。按设计参数进行跟踪排弃,从现状排土台阶坡脚处向下排土,排弃至倾角 6°线位置后不再排弃,3 个方案均跟踪排弃 6 个台阶。通过稳定系数变化曲线得出在背斜区跟踪排弃时,单排土台阶发展过程中排土场边坡的稳定性变化情况。

安全储备系数根据 GB 50197—2015《煤炭工业露天矿设计规范》中内排土场边坡服务年限小于 10 a 的边坡安全系数采用 1.2。结合基底倾角较大的地质特点以及首采区未来规划,对于倾角较大区域排土场边坡,选取安全储备系数为 1.25,其分析模型如图 5 所示,岩土物理力学参数见表 1。

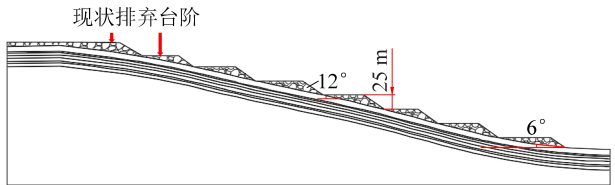


图 5 稳定性分析剖面
Fig.5 Stability analysis profile

表 1 模型各岩层的岩石物理力学参数

Table 1 Each layer of rock physical and mechanical parameters of model					
地层特征	密度/ (g · cm ⁻³)	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)	弹性模量/ 10 ⁴ MPa	泊松比
排弃物	1.99	25.60	22.40	0.017	0.39
泥岩	2.23	154.40	28.50	1.210	0.31
砂岩	2.30	361.50	27.10	1.950	0.22
煤	1.41	210.00	26.0	0.500	0.35
石灰岩	2.61	251.00	33.40	1.250	0.35
基岩	2.29	122.00	29.60	2.000	0.25

2) 基底麻面爆破处理方案对排土场稳定性影响分析。排弃台阶底部基底进行麻面爆破,在背斜区进行排弃后背斜区增加的排弃量不包括基底处理后增加的空间,单位排土量的计算,采用排土台阶剖面面积乘上单位长度 1 m 得出单位排土量。通过计算可得基底拉抗滑沟处理后背斜区增加的单位排弃量为 5 433 m³。通过极限平衡法计算各个排土台阶稳定性系数 F_s 。如图 6、图 7 所示,各个台阶的排弃量如图 8 所示。

从图 6 中可知,倾斜基底单台阶排土滑移模式为以排弃台阶坡顶至排弃物料内部的圆弧滑面为侧滑面,以沿着基底平面为底部滑面的切层-顺层滑

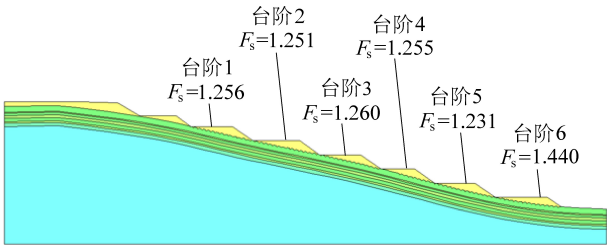


图 6 麻面爆破后排弃台阶稳定性系数 F_s
Fig.6 Stability coefficient F_s of dumping bench after blasting with pitted surface

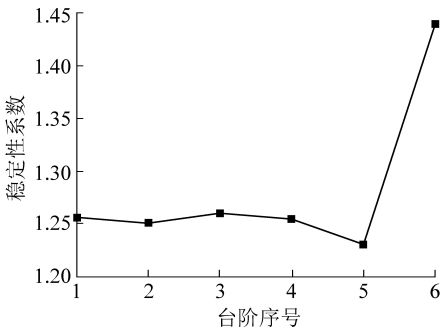


图 7 排弃台阶稳定性系数变化曲线
Fig.7 Stability coefficient curve of dumping benches

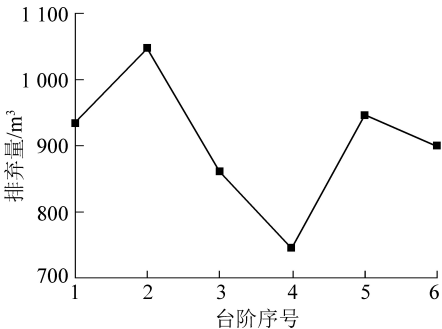


图 8 各个台阶排弃量变化曲线
Fig.8 Curve of the dumping volume of each bench

动,跟踪排弃时各个排土台阶的滑移模式变化不大。从图 7 可知,麻面爆破后前 4 个排土台阶稳定性系数变化较小,其稳定性系数基本保持在 1.25 以上。结合图 7 与图 8 可以知,背斜区相同高度的排土台阶稳定性受到台阶排弃量的影响,排弃量大的台阶往往稳定性低,在倾角过渡区域其影响最大。第 5 个台阶位于倾角由大变小的过渡区域,其基底面更加接近于圆弧滑面,同时排弃量增大使得顺层滑坡的可能性增大,导致安全系数发生了突变。最后 1 个排土台阶到达 6°线处后不再向后排弃,由于其基底倾角较小,跟踪排弃高度由此减小,使得其稳定性偏大,因此麻面爆破后跟踪排弃台阶稳定性较好。

3) 跟踪排弃台阶坡脚处拉抗滑沟处理方案对排土场稳定性影响分析。对排弃台阶底部坡角处基底进行拉沟处理,其台阶参数与麻面爆破所排弃台

阶参数一致。由于不计算基底处理后基底增加空间的排弃,背斜区增加的单位排弃量与麻面爆破一致,为 5 433 m³。背斜区各个排土台阶稳定性系数 F_s 如图 9 图 10 所示,各个台阶的排弃量如图 11 所示。

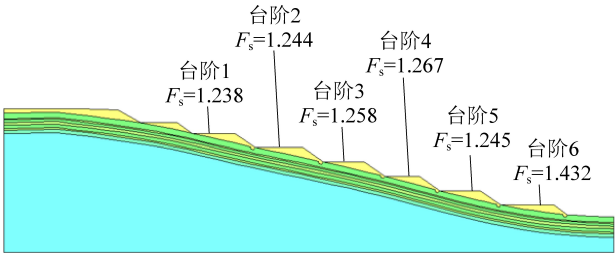


图 9 拉抗滑沟后排弃台阶稳定性系数 F_s
Fig.9 Stability coefficient F_s of dumping benches after excavation anti-sliding ditch

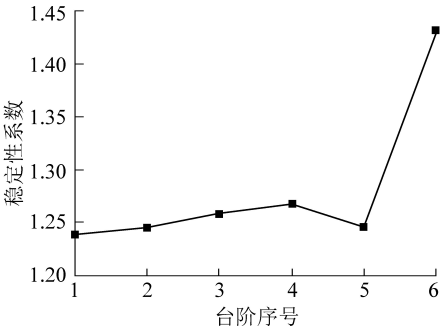


图 10 排弃台阶稳定性系数变化曲线
Fig.10 Stability Coefficient curve of dumping benches

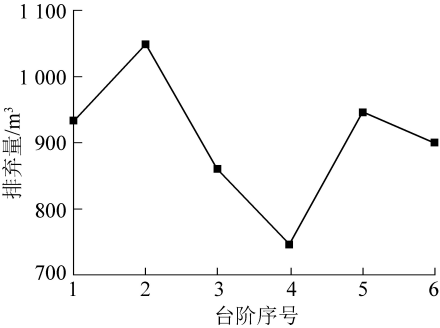


图 11 各个台阶排弃量变化曲线
Fig.11 Curve of dumping volume of each bench

从图 9 可以看出,倾斜基底单台阶排土滑移模式与麻面爆破相同,为以排弃台阶坡顶至排弃物料内部的圆弧滑面为侧滑面,以沿着基底平面为底部滑面的切层-顺层滑动。从图 10 可以看出,背斜区跟踪排弃台阶坡脚处拉抗滑沟后,前 4 个台阶的稳定性有小幅上升趋势且变化不大。结合图 11 排弃量变化曲线可得,当倾角较小且变化不大时如第 1 个以及第 2 个台阶,排弃高度相同的台阶稳定性随排弃量变化较小。当倾角变化较大时,如第 5 个台阶,其台阶稳定性系数随排弃量发生明显变化。最

后 1 个台阶由于其排弃量与麻面爆破最后 1 个台阶相同,其稳定性系数也类似。因此基底掏槽处理后排弃台阶稳定性系数基本位于 1.2 以上,大部分位于 1.25 以上,部分台阶稳定性需通过减小排弃量来提高。

4) 背斜区倾角 12°位置留设抗滑煤柱方案对排土场稳定性影响分析。在基底留设煤柱的同时,调整排土台阶高度为 23 m,煤柱上方的台阶排弃至煤柱上表面,增加排弃量。煤柱下部台阶排弃至 6°线位置,上下共形成 6 个排土台阶,其背斜区单台阶跟踪排弃时增加的单位排弃量为 5 673 m³。计算得出各个排土台阶稳定性如图 12、图 13 所示,各个台阶的排弃量如图 14 所示。

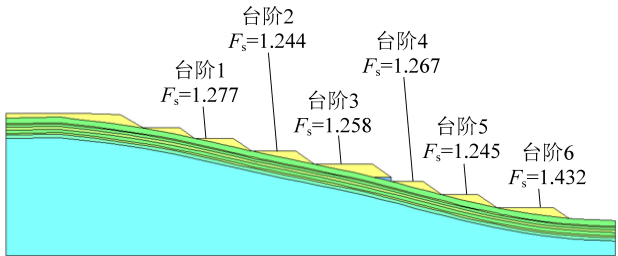


图 12 留煤柱后排弃台阶稳定性系数 F_s
Fig.12 Stability coefficient F_s of dumping benches after retaining coal pillars

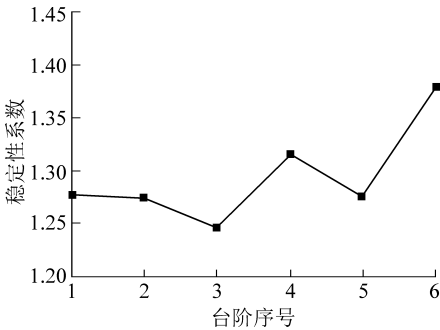


图 13 排弃台阶稳定性系数变化曲线
Fig.13 Stability coefficient curve of dumping benches

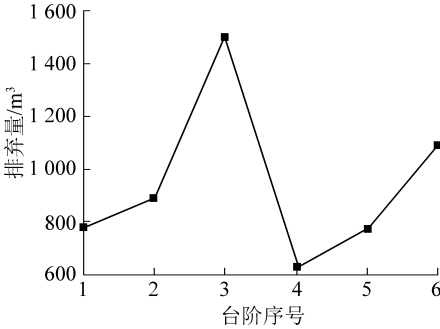


图 14 各个台阶排弃量变化曲线
Fig.14 Curve of dumping volume of each bench

从图 12 可知,单台阶排弃的滑移模式仍为以排弃台阶坡顶至排弃物料内部的圆弧滑面为侧滑面,以沿着基底平面为底部滑面的切层-顺层滑动。从图

13 可知,排土台阶调整高度后稳定性系数均有所增加,其中第 3 个台阶以及第 5 个台阶的安全系数产生了突变,结合图 14 可以得出背斜区排弃台阶,排弃高度相同时安全系数与排弃量大小成反比,第 3 个台阶由于煤柱上部台阶排弃量增加使其安全系数降低,第 5 个台阶则由于圆弧形基底使其排弃量增加,使其稳定性较上一台阶降低。但其排弃量小于基底倾角较小的第 1、第 2 个台阶,使其突变不明显。留设煤柱加上降低排弃高度后,由于在煤柱上增加了排弃,总的排弃量较另外 2 个方案有所增加,且各个排土台阶稳定性基本在 1.25 以上。

3 方案单位成本比对与优选

3.1 单位成本计算

单位成本的计算方法为:针对不同的基底处理方案,计算所选剖面从现状排土位置至基底倾角 6° 线位置,沿着背斜区排土场走向单位长度 1 m 时的单位区域处理成本。3 个方案的单位成本如下:

1)基底麻面爆破方案成本计算(方案一)。通过计算单个台阶基底进行麻面爆破时的穿爆量,按照安家岭露天矿 2020 第 1 季度自营穿爆环节单位立方米生产成本 2.83 元/m³计算单台阶基底麻面爆破的处理成本,再根据背斜区排弃台阶个数,得出背斜区进行麻面爆破的总成本。计算的基底麻面爆破成本见表 2。

表 2 基底麻面爆破成本

Table 2 Cost of blasting pitted surface

台阶数 量/个	穿爆成 本/元	单台阶爆 破岩量/m ³	单台阶成 本/元	方案总成 本/元
6	2.83	56	158.48	950

2)跟踪排弃台阶坡脚处拉抗滑沟方案成本计算(方案二)。通过自营穿爆环节生产成本,以及单个抗滑沟穿爆的土石方量,计算单个抗滑沟的爆破成本,再根据背斜区抗滑沟总个数计算背斜区排弃台阶坡脚处拉抗滑沟处理的总成本,计算排土台阶坡脚处拉抗滑沟成本见表 3。

3)背斜区倾角 12° 位置留设抗滑煤柱方案成本计算(方案三)。通过留设煤柱产生的压煤量以及市场煤价吨煤价格 650 元/t 计算留设煤柱损失的收入,再根据安家岭 2020 年一季度生产环节成本表,生产环节成本合计每立方米岩石的成本为 13.53 元计算留设煤柱节约的生产成本。通过损失的收入减去节约的生产成本得到留煤柱所损失的利润作为留煤柱的总成本。计算的留煤柱成本见表 4。

表 3 排弃台阶坡脚处拉抗滑沟成本

Table 3 Cost of excavation anti-sliding ditch at foot of dumping bench

抗滑沟个 数/个	穿爆成 本/元	单个抗滑沟 爆破岩量/m ³	单台阶成 本/元	方案总成 本/元
6	2.83	24	68	408

表 4 留煤柱成本

Table 4 Cost of retaining coal pillars

留煤柱个 数/个	生产 本/元	压煤 量/m ³	煤岩总 量/m ³	生产总成 本/元	煤柱收 入/万元	方案总成 本/万元
1	13.53	120	152	2 050	11	10.8

由上述计算可知,3 个基底处理方案中,方案二成本最小,方案三成本最大。

3.2 基底处理方案优选

对方案进行评价优选,主要在于评价方法的选择,其中基于熵权 TOPSIS 法在方案比选中应用广泛,该方法首先利用熵权法对各项指标进行权重赋值,再通过 TOPSIS 模型得出方案的最优解。熵权法的优点在于赋权的客观性,其通过根据所选各项指标的变异程度,利用信息熵计算各个指标的权重。TOPSIS 法则是在指标权重基础上计算方案的理想解,通过方案与理想解的距离判断最优解,具有结果直观,方法简便等优点。基于熵权 TOPSIS 法的计算步骤如下:

1)假设提出共 m 个方案,选取共 n 个指标,记录每个方案的指标数值,得出共有 $m \times n$ 个元素的评价矩阵。

2)将评价矩阵进行归一化处理后,得到归一化矩阵 R 。

$$y_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \tag{1}$$

式中: m 为方案数量; x_{ij} 、 y_{ij} 分别为评价矩阵与归一化矩阵 R 中的元素。

3)通过对归一化矩阵 R 中的第 j 列的元素计算得出第 j 个指标的信息熵 C_j ,即

$$C_j = - \frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m y_{ij} \ln y_{ij} \tag{2}$$

4)由信息熵 C_j 可计算得出第 j 个指标的指标权重 w_j ,即

$$w_j = \frac{1 - C_j}{\sum_{j=1}^n (1 - C_j)} \tag{3}$$

5)将指标权重乘上归一化矩阵,得出加权标准化矩阵 R_w ,得

$$R_w = \begin{pmatrix} w_1 y_{11} & \cdots & w_n y_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ w_1 y_{m1} & \cdots & w_n y_{mn} \end{pmatrix} \quad (4)$$

6)通过加权标准矩阵确定评价对象的正理想解和负理想解,其中正理想解为加权标准矩阵各个效益型指标的最大值以及成本型指标的最小值,负理想解则相反。

7)计算第*i*个方案到理想解与负理想解的距离

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (f_{ij} - v_j^+)^2} \quad (5)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (f_{ij} - v_j^-)^2} \quad (6)$$

式中: f_{ij} 为加权标准化矩阵中的元素, v_j^+ 为正理想解, v_j^- 为负理想解。

8)通过方案到正负理想解的距离计算得出方案与理想解的贴近度 C_i ,得

$$C_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad (7)$$

方案优选指标包括方案实施后基底处理成本,背斜区跟踪排土台阶稳定性系数,以及背斜区跟踪排土量 3 个指标。稳定性系数指标通过所处不同阶段安全系数的排弃台阶个数来判断。方案与评价指标见表 5。

表 5 方案以及评价指标
Table 5 Plan and evaluation index

方案	成本 费用/元	不同稳定性系数指标/个			排弃 量/ m^3
		>1.30	1.25~1.30	<1.25	
麻面爆破	950	1	4	1	5 433
拉抗滑沟	408	1	2	3	5 433
留煤柱	108 000	2	3	1	5 673

将表 5 中数据通过式(1)进行归一化处理得到标准化矩阵 R 如下:

$$R = \begin{bmatrix} 0.009 & 0.25 & 0.444 & 0.2 & 0.328 \\ 0.004 & 0.25 & 0.222 & 0.6 & 0.328 \\ 0.987 & 0.50 & 0.334 & 0.2 & 0.344 \end{bmatrix}$$

根据式(2)以及式(3)计算得出信息熵以及指标权重数值,即

$$C_j = [0.07 \quad 0.946 \quad 0.965 \quad 0.865 \quad 0.999]$$

$$w_j = [0.805 \quad 0.047 \quad 0.03 \quad 0.117 \quad 0.001]$$

利用式(4)得出加权标准化矩阵 R_w 为

$$R_w = \begin{bmatrix} 0.007 \ 2 & 0.011 \ 7 & 0.013 \ 3 & 0.023 \ 4 & 0.000 \ 33 \\ 0.003 \ 2 & 0.011 \ 7 & 0.006 \ 6 & 0.070 \ 2 & 0.000 \ 33 \\ 0.794 \ 5 & 0.023 \ 5 & 0.01 & 0.023 \ 4 & 0.000 \ 34 \end{bmatrix}$$

计算方案的正理想解和负理想解为

$$v^+ = [0.003 \ 2 \quad 0.023 \ 5 \quad 0.013 \ 3 \quad 0.023 \ 4 \quad 0.000 \ 34]$$

$$v^- = [0.794 \ 5 \quad 0.011 \ 7 \quad 0.006 \ 6 \quad 0.070 \ 2 \quad 0.000 \ 33]$$

利用式(5)以及式(6)确定方案与正理想解和负理想解的欧氏距离

$$d_i^+ = [0.012 \ 46 \quad 0.048 \ 73 \quad 0.791 \ 31]$$

$$d_i^- = [0.788 \ 72 \quad 0.791 \ 3 \quad 0.048 \ 38]$$

根据式(7)得出各个方案与理想解的贴近度为

$$C = [0.984 \ 45 \quad 0.941 \ 99 \quad 0.057 \ 62]$$

根据贴近度的大小,可以看出上述 3 种方案的优选结果为方案一>方案二>方案三,由此可以确定采用基底麻面爆破方案为最优方案。

4 结 论

1)在背斜区倾角较大处进行单台阶跟踪排弃时,提出针对倾斜基底进行处理的 3 个方案:基底麻面爆破处理,跟踪排弃台阶坡脚处拉抗滑沟处理,以及背斜区倾角 12°位置留设抗滑煤柱。

2)提出了大麻面爆破+小麻面爆破相结合的倾斜基底混合处理模式。

3)由于底板坡度从陡到缓的过渡区基底平面更加接近于圆弧面,使得顺层滑坡的可能性增大,同时台阶排弃量增大,在背斜区排弃高度不变时,排弃量大的台阶稳定性更低。因此 3 个基底处理方案的背斜区过渡区台阶稳定性均发生突变,并显著降低。

4)通过对 3 个方案的基底处理成本,背斜区跟踪排土台阶稳定性系数,以及背斜区跟踪排土量 3 个指标进行熵权法加权,利用 TOPSIS 模型确定基底麻面爆破的处理方案为最佳方案。

参考文献(References):

[1] 赵红泽,杜海瑞,苏海云,等.露天矿多煤层软岩复合边坡底摩擦实验研究[J].煤炭学报,2018,43(10):2724-2731.
ZHAO Hongze, DU Hairui, SU Haiyun, et al. Basal contact friction experiment of composite slope containing soft rock and multiple seam in open pit [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43 (10): 2724-2731.

[2] ZHAO Hongze, WANG Dongyu, MA Ming, et al. Parameter inversion and location determination of evolutionary weak layer for open-pit mine slope [J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2020, 7(4), 714-724.

[3] 王家臣,陈 冲.软弱基底排土场边坡稳定性三维反演分析[J].中国矿业大学学报,2017,46(3):474-479.
WANG Jiachen, CHEN Chong. Three dimensional back analysis for stability of slope dumped on weak basement [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(3): 474-479.

[4] 陈立云.倾斜基底排土场稳定性预测与失稳机制探讨——以胜利煤田西二号露天煤矿排土场为例[J].中国煤炭地质, 2016, 28(3): 50-55.

- CHEN Liyun. Stability prediction and instability mechanism investigation for sloping basement dump: a case study of W₂ surface coalmine dump, Shengli Coalfield [J]. Coal Geology of China, 2016, 28(3): 50-55.
- [5] 祖国林. 倾斜软弱基底排土场滑坡机理模型实验研究[J]. 露天采矿, 1989(1): 21-25.
- ZU Guolin. Model experiment study on landslide mechanism of dumping site on inclined weak base ment [J]. Opencast Mining, 1989(1): 21-25.
- [6] 宋子岭, 刘文坊, 范军富, 等. 倾斜基底内排土场边坡稳定性分析[J]. 金属矿山, 2018(2): 179-183.
- SONG Ziling, LIU Wenfang, FAN Junfu, *et al.* Analysis of the inner dumping slope stability with inclining basement [J]. Metal Mine, 2018(2): 179-183.
- [7] 舒继森, 才庆祥, 车兆学. 倾斜基底软岩排土场边坡失稳机理及防治措施[J]. 阜新矿业学院学报(自然科学版), 1997, 19(6): 670-673.
- SHU Jisen, CAI Qingxiang, CHE Zhaoxue. Instability Mechanism and Prevention Measures of Slope in Soft Rock Dump with Inclined Base [J]. Journal of Fuxin Mining Institute (Natural Science), 1997, 19(6): 670-673.
- [8] 陈冲, 张军. 倾斜基底排土场边坡变形破坏底面摩擦模型实验研究[J]. 金属矿山, 2016(10): 150-154.
- CHEN Chong, ZHANG Jun. Experiment on Deformation and failure features of waste-dump slope based on inclined and weak layer by the floor friction model [J]. Metal Mine, 2016(10): 150-154.
- [9] 曹兰柱, 张剑锋, 王东. 软弱倾斜复合基底排土场边坡失稳机理与控制[J]. 金属矿山, 2019(5): 43-47.
- CAO Lanzhu, ZHANG Jianfeng, WANG Dong. Instability mechanism and control of the dump slope with soft inclined composite basement [J]. Metal Mine, 2019(5): 43-47.
- [10] 赵红泽. 近水平转倾斜煤层露天开采关键技术研究与应用 [D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2012.
- ZHAO Hongze. Key mining technology research and Application in surface mine from flat seam to inclined seam [D]. China University of Mining and Technology (Beijing), 2012.
- [11] 郑晓鹏. 内排土场的变形破坏及防治[J]. 煤矿安全, 2002, 33(7): 37-38.
- ZHEN Xiaopeng. Deformation and destruction of internal dumping site and its prevention [J]. Safety in Coal Mines, 2002, 33(7): 37-38.
- [12] 刘玉凤, 李伟, 马明, 等. 黑岱沟露天矿阴湾排土场滑坡治理技术优化[J]. 煤矿安全, 2017, 48(9): 96-99.
- LIU Yufeng, LI Wei, MA Ming, *et al.* Optimization of treatment technology for landslide in Yinwan Dump of Heidaigou Open-pit Mine [J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(9): 96-99.
- [13] 朱光生, 辛建英. 海州露天煤矿滑坡的综合防治[J]. 露天采矿技术, 1993(4): 25-30.
- ZHU Guangsheng, XIN Jianying. Comprehensive prevention of landslide in Haizhou Open-Pit Coal Mine [J]. Opencast Mining Technology, 1993(4): 25-30.
- [14] 赵洪宝, 魏子强, 罗科, 等. 降雨工况下露天矿排土场边坡稳定性与治理措施[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(10): 67-74.
- ZHAO Hongbao, WEI Ziqiang, LUO Ke, *et al.* Stability and control measures of open-pit mine dump slope under rainfall conditions [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(10): 67-74.
- [15] 伍永千, 黎罡. 边坡支护设计及技术研究[J]. 山西建筑, 2020, 46(4): 64-66.
- WU Yongqian, LI Gang. Study on design and technology of slope support [J]. Shanxi Architecture, 2020, 46(4): 64-66.
- [16] 董凤霖, 张国清. 小麻面爆破法防治边坡滑落的研究[J]. 阜新矿业学院学报, 1988, 10(2): 95-102.
- DONG Fenglin, ZHANG Guoqing. Study on the blasting method of small pitted surface to prevent slope sliding [J]. Journal of Fuxin Mining Institute, 1988, 10(2): 95-102.
- [17] 董凤霖, 张国清. 用小麻面爆破提高边坡稳定性的探讨[J]. 露天采矿, 1986(2): 26-31.
- DONG Fenglin, ZHANG Guoqing. Discussion on improving slope stability by blasting with small pocked surface [J]. Opencast Mining, 1986(2): 26-31.
- [18] 宋子岭, 赵东洋, 张宇航, 等. 露天煤矿绿色开采生态环境评价体系模糊评判研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(10): 58-66.
- SONG Ziling, ZHAO Dongyang, ZHANG Yuhang, *et al.* Study on evaluation model and application of green mining ecological environment evaluation system in open-pit coal mine [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(10): 58-66.
- [19] 唐文亮, 彭洪阁, 马力, 等. 基于Delphi-TOPSIS法的露天矿开采工艺优选[J]. 化工矿物与加工, 2015, 44(10): 39-42.
- TANG Wenliang, PENG Hongge, MA Li, *et al.* Preferred of open-pit mining technology based on Delphi-TOPSIS method [J]. Industrial Minerals & Processing, 2015, 44(10): 39-42.
- [20] 黄国泉, 罗黎明. 基于熵权 TOPSIS 的露天矿坑泵排系统优选[J]. 铜业工程, 2020(3): 6-9.
- HUANG Guoquan, LUO Liming. Optimization of open pit mine pump drainage system based on entropy weight TOPSIS [J]. Copper Engineering, 2020(3): 6-9.
- [21] 刘洋, 叶义成, 刘晓云, 等. 组合赋权-属性区间识别模型法优选采矿方法[J]. 金属矿山, 2017(7): 25-30.
- LIU Yang, YE Yicheng, LIU Xiaoyun, *et al.* Optimal selection of mining method by attribute interval recognition model based on empowerment combination theory [J]. Metal Mine, 2017(7): 25-30.
- [22] 邓红卫, 胡普仑, 杨念哥, 等. 基于组合赋权 TOPSIS 的采矿方法优选[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2012, 37(5): 990-996.
- DENG Hongwei, HU Pulun, YANG Niange, *et al.* Mining method choice based on empowerment combination TOPSIS [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2012, 37(5): 990-996.
- [23] 韩新平, 李世丰. 基于层次分析法的露天矿爆破方案模糊综合优选[J]. 爆破, 2015, 32(4): 64-68.
- HAN Xinping, LI Shifeng. Fuzzy comprehensive optimization of open-pit blasting scheme based on AHP [J]. Blasting, 2015, 32(4): 64-68.