

土质边坡下压煤开采充填布置初探^{*}

王子豪,张秀丽,王浩

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室 武汉 430071)

摘要: 边坡下压煤的开采一直是工程上的难题,在“三下”压煤开采中应用较成熟的充填开采法可以很好地控制边坡移动。本文采用 Abaqus 有限元软件,分析了在不同充填率下,第四系土质边坡坡脚点水平位移随逆坡向开采推进的变化规律。模拟结果表明,随着充填开采推进,不同充填率下坡脚点水平位移都经过先增大、后减小、再增大三个变化过程。开采经过坡脚时位移变化剧烈,而后位移增量逐渐较小,在充填率达到 75% 时,位移增量最终小于 $0.05 \text{ mm} \cdot \text{m}^{-1}$,认为位移收敛。基于坡脚点的水平位移变化分析,提出充填布置优化方案,并进行整体稳定性分析。结合现场监控量测及时反馈,研究结果可以为边坡下矿体安全经济开发提供参考。

关键词: 边坡下采煤; 充填采煤; 充填率; 充填布置优化

中图分类号: TD822

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2015)06-1633-08

Preliminary Study on Backfill Layout in Coal Mining under the Soil Slope

Wang Zihao, Zhang Xiuli, Wang Hao

(Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Wuhan 430071, P. R. China)

Abstract: Coal mining under the slope has been a problem in the engineering, taking into account the serious consequences of slope instability caused by mining. But the backfilling method, well used in coaling under the water, the railway and the building, can be effective on the control of the slope stability. As mining advancing along the inverse slope direction, the horizontal displacement behaviors of the soil slope foot point, at first, was studied in this paper, with different backfill rates, using the FEM software Abaqus. The simulation results show that the horizontal displacements with different backfill rates all experience three changes: first increases, then decreases and then increases again. When exploitation advancing passes the foot point, dramatic changes of horizontal displacement happen, but after that, the displacement increments become progressively smaller and even stable (displacement increment is less than 0.05 mm/m) when the backfill rate reaches 75%. Based on the above analyses, a backfill layout optimization program is proposed and verified to obtain the overall stability. Combined with on-site monitoring and measuring, the research results can be an effective reference for the safe and economic development of relevant mines.

Keywords: coal mining under the slope; backfill mining; backfill rate; backfill layout optimization

* 收稿日期: 2015-01-13(修改稿)

作者简介: 王子豪(1988-) 男,山东威海人,硕士生,主要从事边坡下采矿地表沉降控制方法方面的研究工作。

E-mail: muyexinzhou@126.com

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助(973)项目(2011CB710602); 中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-05-03); 国家自然科学基金(51139004, 41172287)

1 引言

目前,我国地下煤矿大多采用传统长壁全部垮落法开采。由于顶板不做任何管理,随采随垮,上覆岩层经过冒落、断裂、弯曲等一系列变形,将位移不同程度的传递到地表,对地表及其附属物造成破坏。当地表遇到特殊情形,例如“三下采煤”(铁路下、建筑物下、水体下),对地表的位移控制要求严格,一般不可以直接采用垮落法推进。在这方面大量学者做了研究^[1-4],提出了离层注浆、条带开采和充填开采等方案阻止采区顶板位移的向上发展。

边坡下的压煤开采是“三下采煤”问题的延伸,与其有相似之处,同样是对因采动引起的地表位移进行控制,不同之处在于,“边坡下采煤”不仅在于位移量上的控制,还在于边坡稳定性上的控制,并且更具有地质上的特殊性^[5]。历史上曾发生多次因地下采煤引起边坡失稳而造成的地质灾害,以滑坡、崩塌为主,引起较大关注的有 1982 年的陕西韩城象山滑坡、1988 年的云南威信墨黑山滑坡、2009 年的重庆武隆鸡尾山滑坡以及 2013 年初发生的云南昭通镇雄滑坡等。采动引起的滑坡大量存在,据统计截止 2012 年底,仅山西省因采矿活动引发的崩塌、滑坡就达 754 处,影响面积 14 万亩。随着优质地段煤炭资源的减少,解放边坡下压煤,是煤炭开采不得不面临的问题,因此,对边坡下压煤开采的研究不断展开。

针对采动影响下的滑坡问题,自 20 世纪 80 年代以来许多研究者以具体事故实例为基础,采用现场调查、物理模拟和数值模拟等手段,对这一问题进行了理论分析,得到了许多有益的结论,为采动滑坡的研究奠定了基础。王安福等^[6]采用数值模拟,用应力松弛区的概念,研究了采矿对邻近边坡和隧道稳定性的影响。胡广韬等^[7]利用地质力学模型试验和数值模拟,提出了顺倾构造山体在采煤作用下,形成“坍塌拱梁”结构和挤压蠕滑效应,给出了该类型山体侧向变动机理的典型地质模式。邓广哲^[8]在地质调查和流变分析的基础上,以铜川矿区高陡边坡为实例,分析了山体在不同开采条件下的稳定性。孙世国等^[9]从能量耗散的角度分析了不同开采方法对山体的扰动影响规律,并提出边坡稳定状态取决于其开采过程中坡体内部应力路径的变化过程。邓建辉等^[10]基于降雨、水库水

位、变形的监测资料,研究并指出了茅坪滑坡体复活与其周边不合理的采煤活动之间的联系。徐廷甫等^[11]从滑面形态变化的角度分析了地下采煤对顺层岩质边坡稳定性的影响,并运用极限平衡理论给出了采动影响下的顺层岩质边坡稳定性系数的估算公式。

大量的研究工作表明^[6-11],地下采动对边坡的稳定性有着直接的影响。边坡失稳是边坡自身地质地形与地下采动两方面相互作用的结果:边坡的地质地形提供了动力源,决定了滑移的趋势和模式;而地下采动影响坡体应力平衡,弱化了坡体岩性和结构^[12]。但不得不承认,很多研究都是基于已发生的事故,且多为定性分析,对于如何解决边坡下压煤开采,从预防的角度设计合理可靠的开采方案,变被动治理为主动预防,这方面的研究还亟待完善。另外,边坡失稳虽然具有突发性,但其孕育发展具有过程性^[13,14],边坡下压煤的开采对边坡的影响也是一个累积的过程,这种影响甚至延续到矿山开采结束后。所以,虽然一些矿山在开采过程中坡体表现稳定,但由开采产生的节理裂隙可能仍在扩展,这为坡体日后的失稳创造了条件。这种时间上的滞后性,也使很多工程忽视了开采对坡体稳定影响的规模,一旦坡体失稳,可以说其下矿体的开采有着摆脱不了的责任^[6,7,10]。

如前所述,相较成熟的“三下压煤”开采技术,可以作为借鉴,解决坡体下压煤的开采。其中的充填采煤法由于采用置换手段,在保证采出率的情况下,可以较大程度地限制位移的向上扩展,维持原始应力场,并可以通过充填料的强度设置和空间布置,灵活适应不同环境下的压煤开采。另外,在与大型综采设备的结合上,目前已有相应充填配套设备的研制,满足开采充填的机械化运作,达到高效的生产要求^[15]。

本文以贵州发耳煤矿二井区为工程依托,从坡脚点水平位移控制的角度来保证坡体的稳定,并基于对坡体在采动情况下位移场和塑性区的分析,研究了煤层采动对土质边坡稳定性的影响。提出了一种土质边坡下压煤开采充填布置的优化方案并作稳定性计算验证,结果表明,充填体的支撑作用可以有效维护坡体的稳定,减小采动的破坏效应。

2 工程概述

发耳矿区位于贵州省六盘水市南部,是贵州发

耳煤业有限公司设计年产300万吨的特大型矿区,为斜井-平硐综合开拓。其中,即将开采的二井区地质条件复杂,地形迭宕起伏切割强烈,属于构造侵蚀而成的低中山-高中山地貌。最高处位于北面杨家岩,标高1915.60 m;最低处位于发耳河床,标高约960 m;最大高差955.60 m;一般相对高差300~400 m。含煤地层出露标高一般为900~1300 m,呈较开阔的走向谷或缓坡地形,其上覆三叠系地层则形成桌状山,山势陡峻,岩溶发育。

该地区多为岩质边坡,同时,存在数十个古滑坡堆集体,高十几米到上百米不等,由于滑动年代久远,现多已固结稳定。但随着二井区的开采,不排除采动影响造成古滑坡的复活,尤其几处古滑坡范围较大,上下高差达百米,一旦滑动将产生极其严重的后果。矿区开采整体以大型综采长壁垮落采煤法为主,鉴于二井区地质条件复杂,该井区边坡下压煤处拟采用粉煤灰矸石似膏体充填开采,以减少采动对坡体稳定的影响。

充填开采技术在国内外已有上百年的应用历史,积累了大量的工程经验,在解决“三下采煤”问题中起了重要作用,这为边坡下压煤开采提供了较好的示范。经过数十年发展,充填技术先后经历了废弃物干式充填、水沙充填、细沙胶结充填阶段,目前发展为以高浓度充填、膏体充填、块石砂浆胶结充填、全尾砂胶结充填等为代表的现代充填采矿阶段^[15]。

随着采煤技术朝着大型综合机械化发展,充填技术也势必跟进机械化的改进,而粉煤灰矸石似膏体胶结充填管道自溜系统可以很好地与机械化采煤、装煤等设备结合,已在大量工程中得到运

用^[16~18]。发耳煤矿所在地区的贵州发耳电厂,是贵州省“西电东送”重点项目之一,总装机容量达4×600 MW,每年有近200万方粉煤灰的排放量。囤积的粉煤灰作为充填物料不仅可以解放占用的土地资源,也可以解决发耳矿区边坡群下大量压煤问题,符合绿色开采的发展理念^[19]。

由于土质边坡下压煤充填开采的资料较少,该项目还处于论证阶段,本论文主要采用数值模拟手段初步研究不同充填率下坡脚水平位移的变化规律,以此分析开采对坡体稳定性的影响,并提出充填布置优化方案,为该井区安全经济开发提供参考。

3 数值模拟

3.1 模型建立

根据发耳煤矿二井区古滑坡体地形、地质和长壁开采特点,建立二维平面应变模型(图1)。模型高63 m,长122 m,共分4层,自上而下依次为土层、泥岩、煤层和粉砂岩,其中,煤层厚2.5 m。位移边界,左右施加水平位移约束,底部水平垂直约束;初始地应力仅考虑重力引起。采用平面应变四节点单元CPE4划分网格,单元总计1641个,节点总计1790个(图2)。采煤与充填两个过程分别使用“* model change, remove”和“* model change, add”命令实现移除煤体和激活充填体。本构关系采用工程广泛应用的Mohr-coulomb准则,各地层参数如表1。由于详细钻探工作还未展开,此处模型参数和地层分布主要参照一井区建设中的勘察资料,另外为便于分析总结规律,将第四系堆集体与下赋岩层交界面以及煤体倾向做了水平简化。

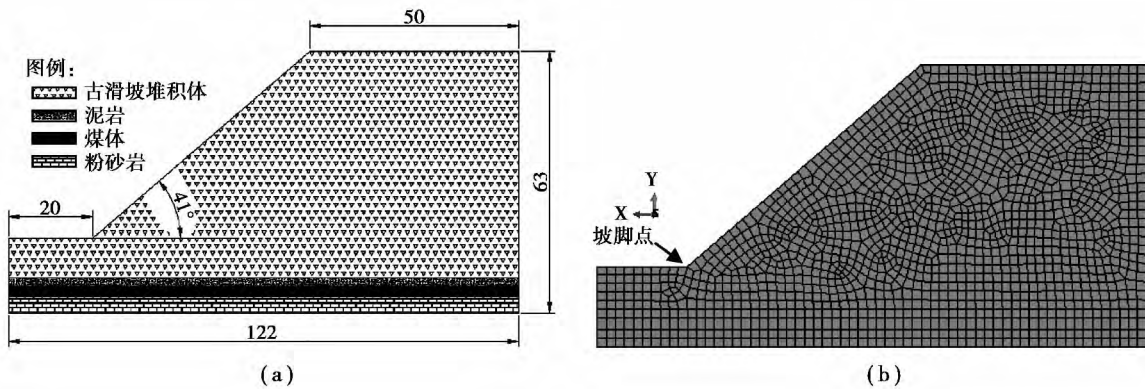


图1 模型尺寸图和网格划分图

Fig.1 Size (a) and meshing plot (b) of the model

表 1 各地层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of stratum

地层	ρ /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	E /GPa	μ	C /MPa	φ /($^\circ$)
土层	2 110	0.03	0.25	0.067	24.9
泥岩	2 510	3.3	0.36	2.21	24.5
煤	1 520	2.69	0.23	2.09	31.8
粉砂岩	2 800	17.5	0.2	12.62	24.5
充填体	1 790	0.1	0.35	0.075	50.5

本文在充填开采模拟之前,边坡的安全系数计算为 1.342,表明未扰动状态下边坡有一定的安全储备,可以在扰动适当的前提下进行有控制的开采活动。

3.2 充填方案

为得到不同充填率下坡脚点水平位移变化规律,分别选用 100%、80%、75%、60%、50%、40%、33.3%、25% 共 8 种充填率进行模拟。为保证上覆岩层不垮落,最大不充填长度控制在 6 m。

由于顺坡向开采使得坡体上部向采空区移动,先发生沉降,从坡体失稳的滑面形态上来看,比逆坡向开采更安全^[9],因此,这里开采方向取不利方向逆坡向进行研究。

3.3 模拟结果分析

在每一充填率下,模拟得到了坡脚点水平位移累积量随开采推进的变化曲线(图 2)和每开挖一米位移增量的变化曲线(图 3)。从图中可以得到:

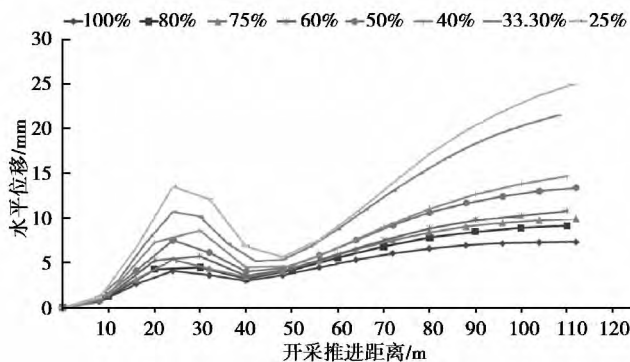


图 2 随开采推进坡脚点水平位移变化曲线

Fig.2 Horizontal displacement curves with different backfill rates

(1) 随开采推进坡脚点水平位移量经过先增大后减小再逐渐增大的过程,具体为:位移量首先朝顺坡向发展逐渐升高,接近坡脚时增幅变大;当开采面经过坡脚点时,在其后 15~25 m 范围内水

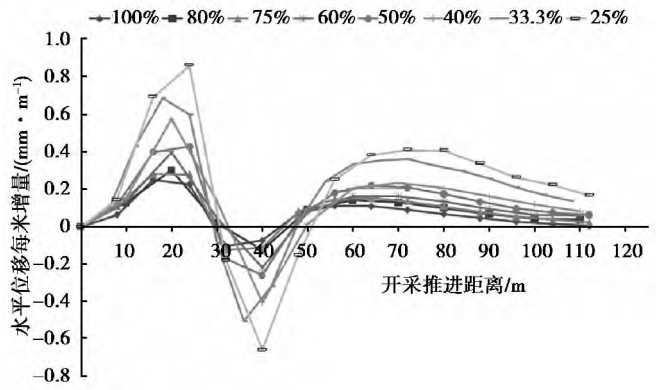


图 3 随开采推进坡脚点水平位移增量变化曲线

Fig.3 Horizontal displacement increment curves with different backfill rates

平位移开始朝逆坡向发展,即总位移量回落;而后反转继续朝顺坡向发展并逐渐升高。

(2) 各充填率下水平位移变化趋势相同,都经过上述三个过程。但不同充填率下位移变化幅度不一样,充填率越小变化幅度越大,即充填率越小坡脚水平位移变化受开采推进影响越敏感。

(3) 随着充填率的增加,相同开采进程下的坡脚水平位移量逐渐减小;相同开采进程下的坡脚水平位移增量绝对值亦表现逐渐减小。

(4) 当充填率达到 75% 且开采至 100 m 处时,每米开采距离对应的坡脚点水平位移增量小于 0.05 mm,可以认为坡脚位移已经收敛,即不再随开采推进而发展,位移最终稳定为 9.71 mm。

(5) 各充填率下每米位移增量绝对值最大值均出现在坡脚附近,在坡脚前 5 m 和坡脚后 15 m 处出现两个较大的峰值。

通过以上规律,发现压煤开采对边坡稳定造成了影响,而充填可以有效控制边坡的稳定。

图 4~7 分别展示了 25% 和 100% 充填率下的边坡水平位移云图和塑性区分布图。从中可以明显看出 25% 充填率下的边坡坡体内部发生较大位移,最大水平位移区分布形态与坡面近于平行;并且坡脚塑性区已经发展,显示滑动趋势。而 100% 充填率边坡位移则相对较小,坡脚无塑性区扩展,充填对边坡的稳定作用显著。

从塑性区分布图还可以看出,塑性区主要自采空区顶部以与坡面近平行的坡度向上发展,证明了采动对坡体的稳定具有影响。同时也表明,边坡下采煤与其他工况下采煤无论在坡面变形还是坡内塑性扩展方式都有着显著的不同,坡面的形态在其中起着重要作用。

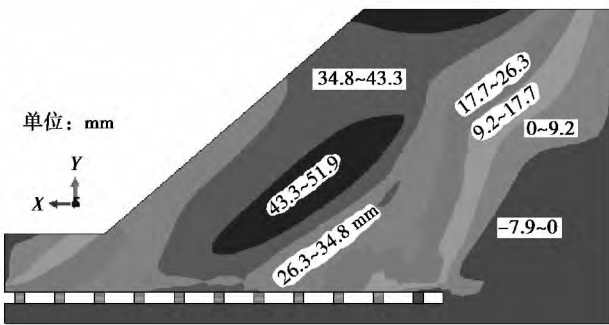


图 4 25%充填率下水平位移云图

Fig.4 Horizontal displacement cloud at 25% backfill

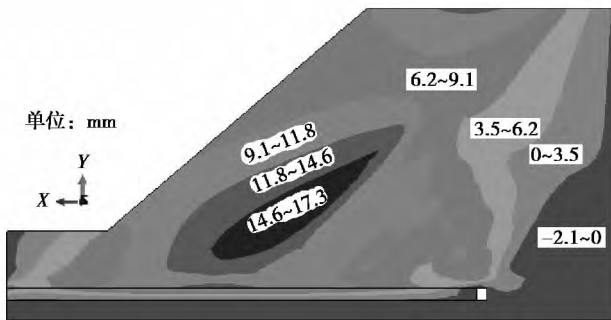


图 5 100%充填率下水平位移云图

Fig.5 Horizontal displacement cloud at 100% backfill

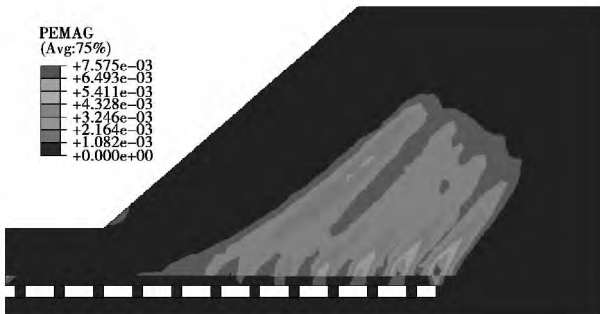


图 6 25%充填率下塑性区分布图

Fig.6 Distribution of plastic zone at 25% backfill

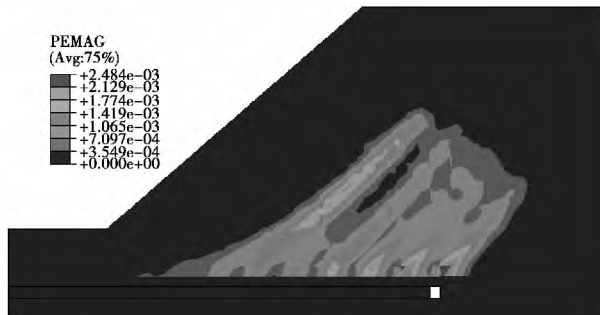


图 7 100%充填率下塑性区分布图

Fig.7 Distribution of plastic zone at 100% backfill

基于以上分析可知,充填率的增高可以约束塑性区的发展范围,在保证采空区顶部塑性范围不与坡脚剪坏区沟通形成连续滑面的情况下,可以实现压煤的安全开采。

4 充填布置优化

4.1 优化方案

充填体的充填与煤层的开采对坡体稳定起着一正一反的作用,在开采的不同进程中同样的开采或充填所发挥的作用是不一样的。基于以上模拟结果的分析可知,坡脚前后区域为整个开采过程中坡体稳定损失最严重的部位,因此,开采时此处煤层可作保留,作为安全煤柱,或者进行 100% 充填。此后煤层的开采,由于开采部位逐渐远离坡脚,采动对边坡稳定性的影响则相应减小,考虑可以将充填率逐渐降低,然后根据数值模拟和现场监测等手段实现充填动态设计。具体步骤如下:

(1) 坡脚前 10 m 和后 20 m 不开采或 100% 充填开采。

(2) 沿两边依次降低充填率进行开采,此处将坡脚后 80 m 划分 4 个分区,首先分别采用 80%、60%、40% 和 25% 充填率进行充填,坡脚前 10 m 60% 充填。将开采过程进行数值模拟。

(3) 根据模拟得到的水平位移量变化曲线和增量变化曲线,对开采过程进行安全性评价。这里以 75% 充填方案下的充填效果作为评价标准参考,即最终位移增量要小于 0.05 mm/m,最终位移量要小于 10 mm。具体的位移控制与边坡安全评价标准还需要更深入的研究和现场监测经验。

(4) 如果充填布置得到的坡脚位移结果未达到以上标准,则逐渐提高充填率;反之,则适当减小充填率,以此得到新的充填布置方案,然后再次进行数值模拟。

(5) 分析新得到的模拟结果,比照判断是否满足评价标准,并重复步骤(4)。

(6) 以最终满足评价标准的最小充填率布置作为充填布置方案,并在实际充填中对坡脚及时进行监控量测,动态调整充填布置。

本次模拟最终得到充填布置如图 8,水平位移变化曲线和位移增量曲线如图 9 和图 10。在此充填布置下,最终位移增量为 $0.035 \text{ mm} \cdot \text{m}^{-1}$,最终位移量稳定在 10 mm,可知达到了 75% 充填率下的稳定效果,总充填率为 70% 略小于 75%。但从位移变化曲线的对比可以看出,在优化过的充填布置

下的位移曲线更加平缓,波动性小,显示了边坡更好的稳定性。研究发现通过优化可以使开采更加经济,充填布置更加合理。

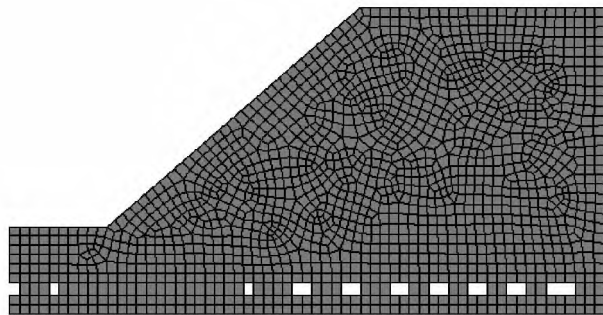


图 8 优化后充填布置

Fig.8 Backfill layout by optimization

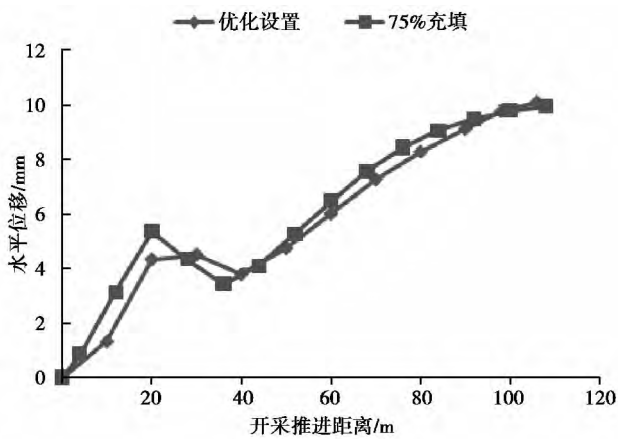


图 9 优化布置与 75% 充填率下水平位移变化对比

Fig.9 Horizontal displacement comparison between optimized and that at 75% backfill rate

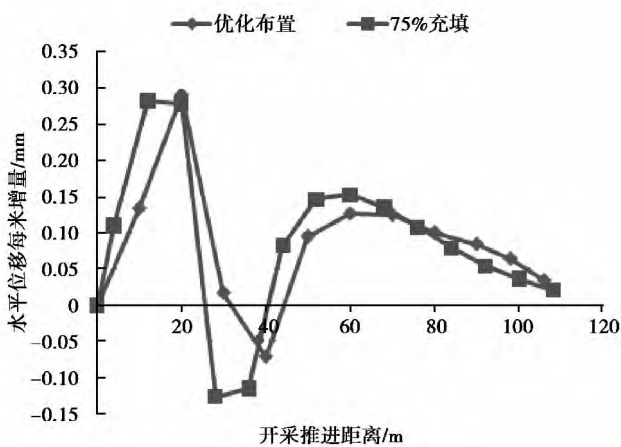


图 10 优化布置与 75% 充填率下水平位移增量变化对比

Fig.10 Horizontal displacement increment comparison between optimized and that at 75% backfill rate

4.2 整体稳定性分析

为分析坡体在采动影响下的整体稳定性变化,采用 Geostudio 软件的 SIGMA/W 模块和 SLOPE/W 模块,对优化后的充填方案进行基于极限平衡法的安全系数计算。

Geostudio 包括 8 个计算模块,可以解决渗流、震动、变形、温度及污染物扩散等多种类型问题,自 2007 版以来各模块计算结果可以相互联系使用。其中, SIGMA/W 是专业的变形分析模块,可以用来模拟矿体开挖与充填过程,而 SLOPE/W 可以承接 SIGMA/W 的应力计算结果,直接进行极限平衡分析,而且具有自动搜索滑面的功能^[20-21]。由于应力场已经完全求出,所以在滑面确定的情况下,不必进行迭代,即可得到各条块间的法向力及切向力,且满足所有力的平衡条件,因而是属于严格的计算方法^[20]。

图 11 显示在某一推进距离下采用 SIGMA/W 模块计算得到的竖向应力云图和 SLOPE/W 模块自动搜索的危险滑面计算图。依次计算各推进距离下的应力场,并得到安全系数,将各开采步下安全系数与开采距离相对应,作图 12。可以看出,充填作用对维护原始应力场,起了很大作用,边坡安全系数整体起伏较小,波动在 1.33 和 1.35 之间,位于安全范围之内,表现较小的稳定性扰动。

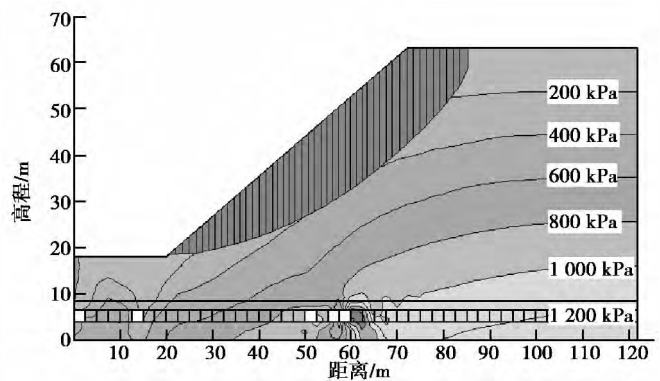


图 11 SIGMA/W 和 SLOPE/W 计算图

Fig.11 Combined calculations with SIGMA/W & SLOPE/W

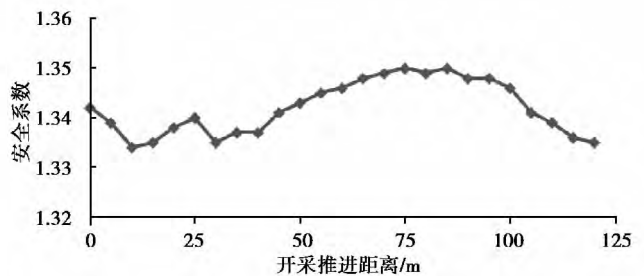


图 12 安全系数变化图

Fig.12 Factor of safety varies with excavation

5 结 论

边坡下压煤开采涉及到开采和边坡稳定的交互作用,国内外在此方面的研究较少。笔者以发耳煤矿二井区为工程背景,针对土质边坡进行不同充填率下的数值模拟。得到以下结论:

(1) 充填可以限制顶板位移,从而减少坡体扰动,有效的充填布置可以保证坡体的稳定实现边坡下的压煤开采。

(2) 随着充填开采逆坡向推进,坡脚点水平位移经过沿顺坡向先增大、后减小、再增大三个变化过程,开采经过坡脚前后时位移变化剧烈,而后位移增量逐渐较小,在充填率达到一定值时,位移增量趋于零,位移收敛。

(3) 通过对位移变化规律的分析,提出了充填布置优化方案,指出结合现场监控量测,进行动态充填布置可以实现矿山安全经济开发。

(4) 充填作用减弱了开采冒落对原始应力场的影响,从而在根本上保证了边坡原始稳定性。

作为前期研究,本文未考虑水、地震及构造节理等的影响,而且保证坡体稳定的位移控制标准还需要更多的理论支持及现场实测经验来确定,分析结果距离工程应用还有差距。但数值模拟得到的位移变化规律,可以为工程提供有价值的参考,在实际工程应用中,数值模拟仍不失为一种有力的辅助研究手段。

参考文献(References)

- [1] 苏仲杰,刘文生. 减缓地表沉降的覆岩离层注浆新技术的研究[J]. 中国安全科学学报, 2001, 11(4): 21-24. (Su Zhongjie, Liu Wensheng. Study and application of new grouting technology for separated strata to slacken the surface subsidence [J]. China Safety Science Journal, 2001, 11(4): 21-24. (in Chinese))
- [2] 王新民,卢央泽,张钦礼. 煤矸石似膏体胶结充填采场数值模拟优化研究[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(2): 346-450. (Wang Xinmin, Lu Yangze, Zhang Qinli. Simulating and optimizing the configuration parameter of stope in plaster-like filling [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008, 4(2): 346-450. (in Chinese))
- [3] 郭文兵,邓喀中,邹友峰. 岩层与地表移动控制技术的研究现状及展望[J]. 中国安全科学学报, 2005, 15(1): 8-10. (Guo Wenbing, Deng Kazhong, Zou Youfeng. Research progress and prospect of the control technology for surface and overlying strata subsidence [J]. China Safety Science Journal, 2005, 15(1): 8-10. (in Chinese))
- [4] 杨逾,刘文生,缪协兴,等. 我国采煤沉陷及其控制研究现状与展望[J]. 中国矿业, 2007, 16(7): 43-46. (Yang Yu, Liu Wensheng, Miu Xiexing, et al. The research status and view of the mining subsidence and its control technology in China [J]. China Mining Magazine, 2007, 16(7): 43-46. (in Chinese))
- [5] 范士凯. 采空区上边坡稳定问题[J]. 资源环境与工程, 2006, 20(增): 617-627. (Fan Shikai. A discussion on the slope stability on the goaf [J]. Resources Environment & Engineering, 2006, 20(Supp.): 617-627. (in Chinese))
- [6] 王安福,马丽. 地下采空区引起山体滑坡的机理与防治对策[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1998, 9(增): 33-39. (Wang Anfu, Ma Li. Studies on mechanism of landslide caused by mined-out area and the effective prevention strategy [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1998, 9(Supp.): 33-39. (in Chinese))
- [7] 胡广韬,林叔中,赵法锁. 大跨度采空影响顺倾构造山体侧向变动的复合机理[J]. 工程地质学报, 1993(1): 51-64. (Hu Guangtao, Lin Shuzhong, Zhao Fasuo. Composite mechanism of lateral movement of the slope on a down dip structure mountain associated with the underground excavation about long-span [J]. Journal of Engineering Geology, 1993(1): 51-64. (in Chinese))
- [8] 邓广哲. 矿山高陡边坡崩塌灾害演化的成因分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(增): 45-48. (Deng Guangzhe. Cause analysis of landslip disaster evolvement of high hilly slope in mine [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(Supp.): 45-48. (in Chinese))
- [9] 孙世国,蔡美峰,徐嘉汉,等. 地下采区开采方法对边坡岩体变形的影响规律[J]. 金属矿山, 1999(8): 8-10. (Sun Shiguo, Cai Meifeng, Xu Jiahuan, et al. The law influencing the slope rock mass deformation by underground mining methods [J]. Metal Mine, 1999(8): 8-10. (in Chinese))
- [10] 邓建辉,马水山,张保军,等. 清江隔河岩水库茅坪滑坡复活机理初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增): 1-5. (Deng Jianhui, Ma Shuisan, Zhang Baojun, et al. Preliminary study on the reactivation mechanism of Mao Ping landslide in Qingjiang Gheyan Reservoir [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(Supp.): 1-5. (in Chinese))

- 2003, 22(10): 1730-1737. (Deng Jianhui, Ma Shuishan, Zhang Baojun, et al. Preliminary investigation on the reactivation of Maoping Landslide, Geheyan Reservoir, Qingjiang River [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22 (10): 1730-1737. (in Chinese))
- [11] 徐廷甫, 尹志明, 邓月. 地下采动条件下顺层岩质边坡稳定性分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(6): 1241-1245. (Xu Tingfu, Yin Zhiming, Deng Yue. Stability analysis of bedding rock Slope at underground mining condition [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(6): 1241-1245. (in Chinese))
- [12] 李腾飞, 李晓, 苑伟娜, 等. 地下采矿诱发山体崩滑地质灾害研究现状与展望 [J]. 工程地质学报, 2011, 19(6): 831-838. (Li Tengfei, Li Xiao, Yuan Weina, et al. Current status and prospects of studies on mechanism of landslide geohazards induced by underground mining [J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(6): 831-838. (in Chinese))
- [13] 许年春, 吴同情, 秦娟. 岩石蠕变对边坡支挡力影响的有限元分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(增 1): 1470-1474. (Xu Nianchun, Wu Tongqing, Qin Juan. Finite element analysis on influence of rock creep on slope retaining force [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(Supp.1): 1470-1474. (in Chinese))
- [14] 董瑞朝, 陈孝刚, 陶志刚. 陕西凤凰山滑坡体稳定性评价及敏感性分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(增 2): 1737-1742. (Dong Ruichao, Chen Xiaogang, Tao Zhigang. The stability evaluation and sensitivity analysis on the Shanxi Fenghuang Mountain slope [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(Supp.2): 1737-1742. (in Chinese))
- [15] 缪协兴, 张吉雄, 郭广礼. 综合机械化固体废物充填采煤方法与技术 [M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 2010. (Miu Xiexing, Zhang Jixiong, Guo Guangli. Method and technology of fully-mechanized coal mining with solid waste filling [M]. Beijing: China University of Mining and Technology Press, 2010 (in Chinese))
- [16] 胡华, 孙恒虎. 矿山充填工艺技术的发展及似膏体充填新技术 [J]. 中国矿业, 2011, 10(6): 47-50. (Hu Hua, Sun Henghu. Development of backfill technology and the new backfill process using paste-like material [J]. China Mine, 2011, 10(6): 47-50. (in Chinese))
- [17] 周华强, 侯朝炯, 孙希奎, 等. 固体废物膏体充填不迁村采煤 [J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(2): 154-158. (Zhou Huaqiang, Hou Chaojiong, Sun Xikui, et al. Solid waste paste filling for none-village-relocation coal mining [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, 33(2): 154-158. (in Chinese))
- [18] 崔增娣, 孙恒虎. 煤矸石凝石似膏体充填材料的制备及其性能 [J]. 煤炭学报, 2010, 35(6): 896-899. (Cui Zengdi, Sun Henghu. The preparation and properties of coal gangue based on sialite paste-like backfill material [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(6): 896-899. (in Chinese))
- [19] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林. 资源与环境协调(绿色) 开采及其技术体系 [J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(1): 1-5. (Qian Minggao, Miu Xiexing, Xu Jialin. Resources and environment harmonics (green) technology [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2006, 23(1): 1-5. (in Chinese))
- [20] John Krahn. Stability Modeling with SLOPE/W 2007 Version [M]. Geo-Slope International Ltd. 2007.
- [21] John Krahn. Stress-deformation modeling with SIGMA/W 2007 Version [M]. Geo-Slope International Ltd. 2007.