深凹露天坑挂帮矿体安全高效开采技术研究*

田世国[1],李广涛[1],乔登攀[1],孙进辉[2],李子彬[1],杨天雨[1],熊志朋[3]

(1.昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093;
2.凉山矿业股份有限公司, 四川 会理市 615146;
3.昆明冶金研究院有限公司, 云南 昆明 650021)

摘要:挂帮矿开采作为一种介于露天开采与地下开采之间的过渡方案,对于确保矿山在时间、空间以及产量上的无缝衔接具有重要意义。以落凼矿区西区的挂帮矿体为研究对象,鉴于该矿体位于高边坡之下且紧邻露天运输系统的复杂地质条件,采用两步骤条带式上向水平分层充填采矿法回采。采用FLAC3D数值模拟软件对挂帮矿回采过程中采场、边坡以及露天运输系统的稳定性进行了深入的模拟分析。研究结果表明,采用该采矿方法回采挂帮矿体时,采场顶板塑性区范围和位移最大值分别为3.4 m和6.6 mm,边坡及露天运输系统塑性区范围和位移最大值分别为9.5 m和5.8 mm;采场、边坡及露天运输系统拉应力最大值为1.2 MPa,整体稳定性良好;在挂帮矿回采过程中,采场距边坡的距离与采场稳定性之间呈显著的负相关关系。研究可为相似矿山开采挂帮矿体提供理论参考。

关键词:深凹露天坑;挂帮矿;条带式开采;相关性分析;边坡稳定性

中图分类号:TD853 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)01-0039-13

Research on Safe and Efficient Mining Technology of Hanging Wall Ore Body in Deep Open Pit

TIAN Shiguo[1], *LI Guangtao*[1], *QIAO Dengpan*[1], *SUN Jinhui*[2], *LI Zibin*[1], *YANG Tianyu*[1], *XIONG Zhipeng*[3]

(1.Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093, China;
2.Liangshan Mining Co., Ltd., Huili, Sichuan 615146, China;
3.Kunming Metallurgical Research Institute Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650021, China)

Abstract: As a transition scheme between open pit mining and underground mining, hanging wall ore mining is of great significance to ensure the seamless connection of mine in time, space and yield. The hanging wall ore body in the western area of Luodang mining area was taken as the research object. In view of the complex geological conditions that the ore body is located under the high slope and adjacent to the open-pit transportation system, the two-step strip upward horizontal layered filling mining method was adopted. FLAC3D numerical simulation software was used to simulate and analyze the stability of stope, slope and open-pit transportation system in the process of mining. The results show that when the mining method is used to mine the hanging wall ore body, the plastic zone range and the maximum displacement of the stope roof are 3.4 m and 6.6 mm, respectively, and the plastic zone range and the maximum displacement of the slope and open-pit transportation system are 9.5 m and 5.8 mm, respectively. The maximum tensile stress of the stope, slope and open-pit transportation system is 1.2 MPa, and the overall stability is good. In the process of hanging wall ore mining, there is a significant negative correlation between the stope-slope distance with the stability of the stope. The research can provide theoretical reference for the mining of hanging wall ore bodies in similar mines.

Key words: Deep open pit, Hanging wall ore, Strip mining, Correlation analysis, Slope stability

0 引言

挂帮矿是指圈定露天开采境界时,由于矿体赋存特征和经济合理采剥比限制,未能圈入露天境界内而被遗留于境界之外的矿体[1]。统计资料显示,露天开采结束后,挂帮矿的资源量约占露天开采总量的5%~16%[2]。挂帮矿体回采不仅有利于减少资源浪费,还能延长矿山服务年限。然而,挂帮矿体

* **收稿日期**:2025-02-11
基金项目:云南省基础研究青年项目(202301AU070185)
作者简介:田世国(1999—),男,云南昆明人,硕士研究生,主要研究方向为采矿理论及工艺研究。E-mail:1358382398@qq.com
通信作者:李广涛(1982—),男,江苏宿迁人,高级工程师,主要研究方向为采矿理论及工艺研究。E-mail:478693137@qq.com

赋存于露天边坡内,露天边坡经过长时间的开采扰动,应力状态已发生显著变化[3-5]。临空面的产生以及上覆边坡自重压力的作用,易造成边坡岩体进入塑性损伤状态,挂帮矿体的回采过程会进一步加剧边坡岩体的塑性损伤,极易引发露天边坡失稳[6-7]。因此,如何在保证边坡稳定的情况下回采挂帮矿体成为亟需解决的问题。近年来,国内外学者对此进行了大量研究,鉴于挂帮矿体特殊的赋存特征,当露天边坡不需要保护时,常选用崩落法对挂帮矿体进行回采,如石碌铁矿[8]、白云鄂博铁矿东矿挂帮矿[9-10]都采用该方法回采。此外,部分矿山通过诱导冒落回采挂帮矿体,如大孤山铁矿等[11-13]。

当露天边坡需要特别保护时,充填法凭借其独特优势,成为回采挂帮矿体的首选方法之一。该方法主要通过分层充填、分段嗣后充填等手段进行矿体回采,并利用充填体控制地压,从而在提升矿体回采率的同时,确保生产安全。具体实践中,徐帅等[14]针对高陡边坡及露天运输系统下方的挂帮矿体,采用了分区进路充填法,实现了安全高效的矿体回采;吴姗等[15]则以武钢大冶铁矿尖山挂帮矿体为例,深入分析了充填开采过程中采场及露天边坡的稳定性;谭玉叶等[16]利用 GEO-SLOPE 软件对挂帮矿开采中的边坡稳定性进行了评估,并结合现场监测与模型相似试验,研究了矿柱及围岩的应力、位移变化规律,进一步探讨了充填法开采对采场围岩稳定性的影响;毛瑞坤等[17]针对某铁矿具体情况,提出采用分段空场嗣后充填采矿法,并验证了其在回采挂帮矿中的安全性和适用性;王平等[18]以武钢集团程潮铁矿东区前期开采遗留的挂帮矿为研究对象,通过相似试验全面模拟了充填法开采挂帮矿的全过程,进一步验证了充填法回采挂帮矿的安全性;刘形林等[19]针对冬瓜山铜矿高品质挂帮矿,提出采用上向水平进路充填采矿法进行回采,在保证开采区域稳定的同时,增大了挂帮矿回采的安全性。

综合现有文献,挂帮矿体的回采方式主要包括崩落法和充填法。在面临环境复杂且需维护边坡稳定性的矿山,上向水平分层充填采矿法常被视为首选方案。然而,传统的进路式上向水平分层充填法存在生产能力较低的问题,难以满足矿山的产量需求。鉴于此,本研究针对落凼矿区西区挂帮矿体的赋存特征,提出采用两步骤条带式上向水平分层充填采矿法。为验证该方法的可行性与安全性,研究借助数值模拟软件对挂帮矿体回采过程进行了模拟分析,内容涵盖采场、边坡及露天运输系统的塑性区分布、应力分布和位移变化,以期为挂帮矿体的安全高效回采提供理论支撑。

1 落凼矿区挂帮资源及工程概况

凉山矿业股份有限公司落凼矿区为露天转地下开采矿山,以 1 890 m 为界限,以上采用露天开采,以下转为地下开采。落凼矿区露天坑西区 1 890～2 010 m 标高内遗留挂帮矿体,其位置如图 1 所示。根据落凼矿区挂帮矿探矿成果,西区挂帮矿铜矿资源量为 108.8 万 t,铜矿品位为 0.72%,西区挂帮矿体赋存条件为:矿体厚度介于 15～20 m,矿体倾角介于 20°～30°,走向长度约为 200 m。矿体围岩为钠长岩和片岩。

落凼矿区挂帮矿体回采面临诸多挑战,西区挂帮矿赋存于标高 2 030 m 和标高 1 986 m 地表运输道路下方,矿体上盘距地表不足 80 m;斜坡道入口位于标高 1 999 m 的露天台阶上,无轨设备进入井下生产系统需要借助露天运输系统;矿区充填制备站及选矿厂位置均位于露天西侧平台(标高 2 095 m、2 048 m),井下充填管道沿着露天台阶向下铺设。因此,落凼矿区西区挂帮矿回采过程中,需全面考虑地表环境及安全性,确保边坡稳定,并保障露天运输系统、充填制备站与选矿厂的正常运行。

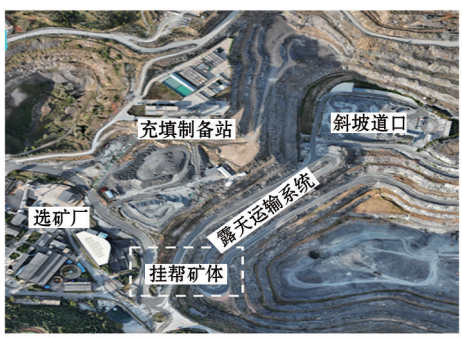


图 1 落凼矿区西区挂帮矿赋存地表环境

Fig.1 The surface environment of hanging wall ore in the west of Luodang mining area

2 挂帮矿回采方案

落凼矿区西区挂帮矿体赋存于边坡及露天运输系统之下,因此在开采过程中,必须考虑爆破振动对这两大系统稳定性的影响。若采用中深孔嗣后充填采矿法,强烈的爆破振动会显著加剧边坡及露天运输系统的不稳定性。鉴于矿体复杂的赋存环境及对

边坡保护的迫切需求,浅孔充填采矿法成为了更为合适的选择。浅孔留矿法主要包括进路式、点柱式和条带式等。然而,这些方法均存在一定的局限性。进路式采矿法顶板管理难度大且产能相对较低,不利于确保矿山产量的连续性。点柱式采矿法资源损失率较高,难以满足矿山经济效益最大化的需求。相比之下,条带式采矿法通过两步骤条带开采,利用胶结充填体替代矿柱来支撑采场上盘围岩,既无需设立点柱,又能安全高效地回采挂帮矿体。此外,其分层条带尺寸大于分层进路尺寸,提高了采矿效率,能够满足矿山的产量需求。

综合权衡各种采矿方法的优缺点后,提出采用两步骤条带式上向水平分层充填采矿法回采落凼矿区西区的挂帮矿体。

两步骤条带式上向水平分层充填采矿法采场布置如图 2 所示。

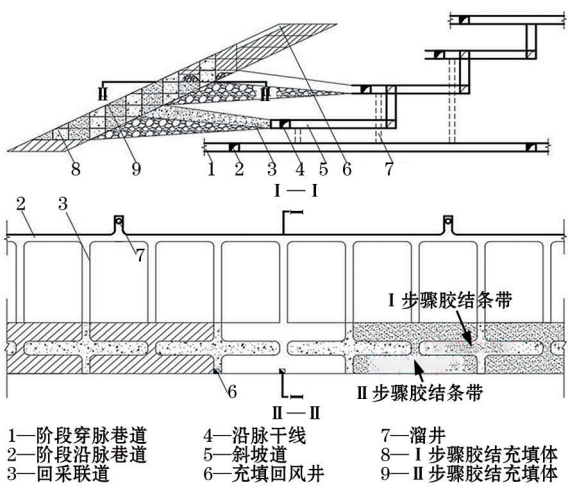


图 2 两步骤条带式上向水平分层充填采矿法

Fig.2 Two-step strip upward horizontal layered filling mining method

2.1 采场结构参数

两步骤条带式上向水平分层充填采矿法沿矿体走向布置盘区,盘区长度为 200 m,以穿脉巷道为轴心沿矿体走向布置采场。倾向方向以 20 m 为控制划分分段,沿矿体倾向划分Ⅰ步骤条带和Ⅱ步骤条带,Ⅰ步骤条带宽度为 6 m,Ⅱ步骤条带宽度为 8 m,条带内将矿体按分层高度为 3～5 m 划分为分层进行上向开采。盘区按 100 m 可划分为 4 个条带采场,因条带相互穿插,实际各条带控制长度约为 100 m。

2.2 采准切割工程布置

凉山矿业落凼矿区的井下生产系统现已投入运行,采用无轨斜坡道开拓方式。具体开拓方案为:无轨斜坡道掘进至穿脉巷道,再从穿脉巷道延伸至沿脉巷道,形成完整的井下矿石运输系统;采用下盘脉外分段采准方式,设计在下层矿体下盘沿矿体走向布置分段沿脉干线,与矿体距离为 55～60 m,由分段沿脉干线设置采场穿脉出矿,便于铲运机在分层回采工作面作业。

2.3 回采及充填作业

分段内首层矿体回采由沿脉干线开始,向下掘进回采联道贯穿矿体,联道倾角为 15%。随后,在回采联道内掘进脉内凿岩巷道,为爆破落矿提供补偿空间。采用水平浅孔落矿工艺,首层矿体的控顶高度为 4 m。矿体开采完成后,由铲运机将矿石运至分段溜井,再经穿脉巷道集中出矿。首层矿体回采结束后,采用灰砂比为 1∶4 的胶结充填料对采空区进行充填,充填高度为 3.3 m,同时预留未充填空间,作为下一分层爆破落矿的补偿空间。在分段首层矿体的回采充填完成后,通过回采联道挑顶、压底形成下一分层的回采联道,并重复上一分层的回采与充填工序。待分段内Ⅰ步骤条带回采与充填完成后,再开展Ⅱ步骤条带的回采与充填作业。

矿体平均厚度为 15～20 m,通过Ⅰ、Ⅱ步骤条带开采,每个分段可以实现 3～5 层矿体的回采高度,这一设计能够有效覆盖矿体的上盘区域。该布局方式不仅提升了矿体回采的覆盖率,还有助于解决充填接顶的问题,使充填体紧密贴合矿体顶板,大幅提高了井下采空区的稳定性和安全性,为挂帮矿体的高效、安全回采提供了可靠保障。基于挂帮矿体赋存条件,沿矿体倾向方向布置 3～5 个条带,其中Ⅰ步骤条带 1～2 个,Ⅱ步骤条带 2～3 个。每个条带单循环采矿量 200 t,每天 1.5 个循环,每天采矿量达 300 t。在双条带同步回采的设计条件下,挂帮矿日采矿量可达 600 t,有效保障了资源的高效回采和产能的持续稳定。

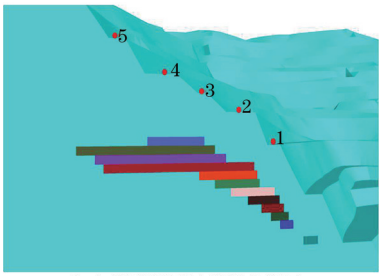
3 挂帮矿回采方案数值模拟分析

3.1 数值模型构建及参数选取

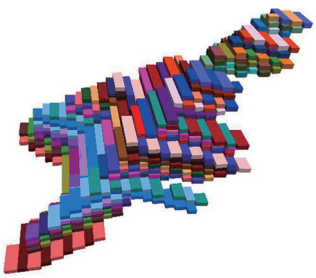
3.1.1 挂帮矿数值模型构建

根据落凼矿区西区挂帮矿体地质资料,采用 3Dmine-FLAC3D 建立落凼矿区挂帮矿体回采数值计算模型,模型标高范围为 1 500 m 至地表,长度和宽度尺寸分别为 2 500 m 和 2 200 m。模型包含边坡、岩层、境界、挂帮矿体。挂帮矿体标高范围 1 890～2 010 m,按 4 m 分层高度划分为 30 个分层。为了更好地分析挂帮矿体回采对边坡及露天运输系统稳定性的影响,于边坡及露天运输系统处布置位移监测

点,模拟挂帮矿体卸荷开挖和充填过程中各监测点的位移的变化情况。挂帮矿体数值模型如图 3 所示。



(a) 数值模型及监测点位置



(b) 挂帮矿体采场分布

图 3 挂帮矿数值模型

Fig.3 The numerical model of hanging wall ore

3.1.2 初始地应力

挂帮矿体埋深较浅,故垂直方向应力取上覆岩体自重应力,水平方向应力根据侧压力系数确定。本构模型选用 Mohr-Coulomb 弹塑性模型,计算域边界采取位移约束,模型四周及底部均采用位移约束,上部为应力边界。经赋值计算,模型初始地应力分布情况如图 4。

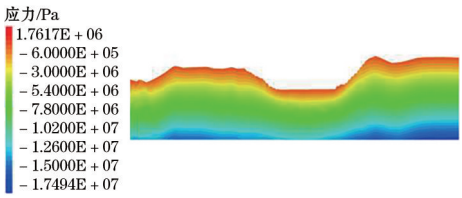


图 4 模型垂直应力分布情况

Fig.4 Distribution of vertical stress in the model

3.1.3 模型岩体力学参数

岩体力学参数由落凼矿区边坡岩石现场取样,经室内岩石力学试验获得岩石力学参数后,折减为现场岩体力学参数,结果见表 1。

表 1 岩体力学参数

Table 1 Mechanical parameters of rock mass

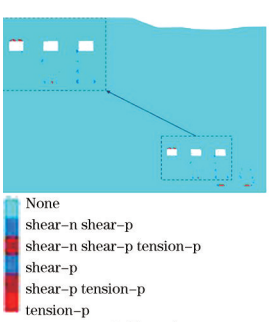
材料	弹性模量/GPa	泊松比	内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa	抗拉强度/MPa	抗压强度/MPa	密度/(g/cm³)
钠长岩(片状)	16.37	0.18	42	1.34	0.80	8.33	2.82
钠长岩(块状)	14.16	0.18	43	1.57	1.24	6.23	2.86
片岩	18.07	0.19	41	2.33	1.62	9.11	2.96
胶结充填体	0.88	0.26	35	0.45	0.25	2.20	2.20
尾砂充填体	0.20	0.30	27	0.02	0.00	1.90	1.90

3.2 挂帮矿回采采场稳定性分析

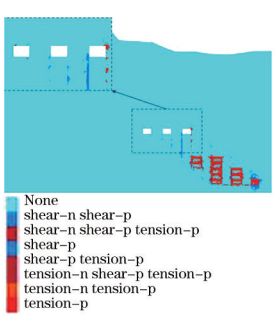
落凼矿区挂帮矿赋存条件复杂,采用两步骤条带式上向水平分层充填采矿法回采时,Ⅰ、Ⅱ步骤采场稳定性直接影响露天边坡稳定性及露天运输系统稳定性。因此,对挂帮矿体回采过程中两步骤条带采场的开展稳定性分析尤为重要。采场稳定性主要通过矿体回采过程中顶板塑性区、顶板位移及顶板应力等参数进行评价。落凼矿区西区挂帮矿体共划分为 30 个分层,本文选取其中 6 个典型分层对两步骤条带开挖采场稳定性进行分析。

3.2.1 顶板塑性区分布

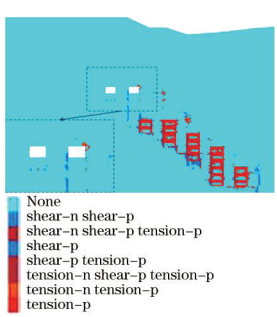
顶板塑性区的形成及扩展是导致采场顶板失稳的重要因素,塑性区的形态、范围及塑性区集中出现的位置对顶板的变形及破坏有着重要影响。由图 5 可知,Ⅰ步骤条带回采结束后,各分层顶板塑性区分布趋势如下:第 5 分层至第 15 分层顶板塑性区缓慢增加,第 20 分层至第 30 分层顶板塑性区呈减少趋势。塑性区集中出现于顶板与侧帮交界处,破坏类型为拉伸破坏。



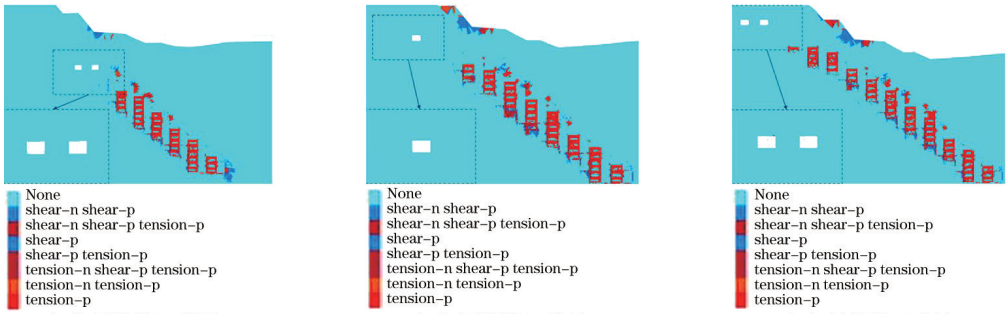
(a) 开挖第 5 分层



(b) 开挖第 10 分层



(c) 开挖第 15 分层



（d）开挖第 20 分层　（e）开挖第 25 分层　（f）开挖第 30 分层

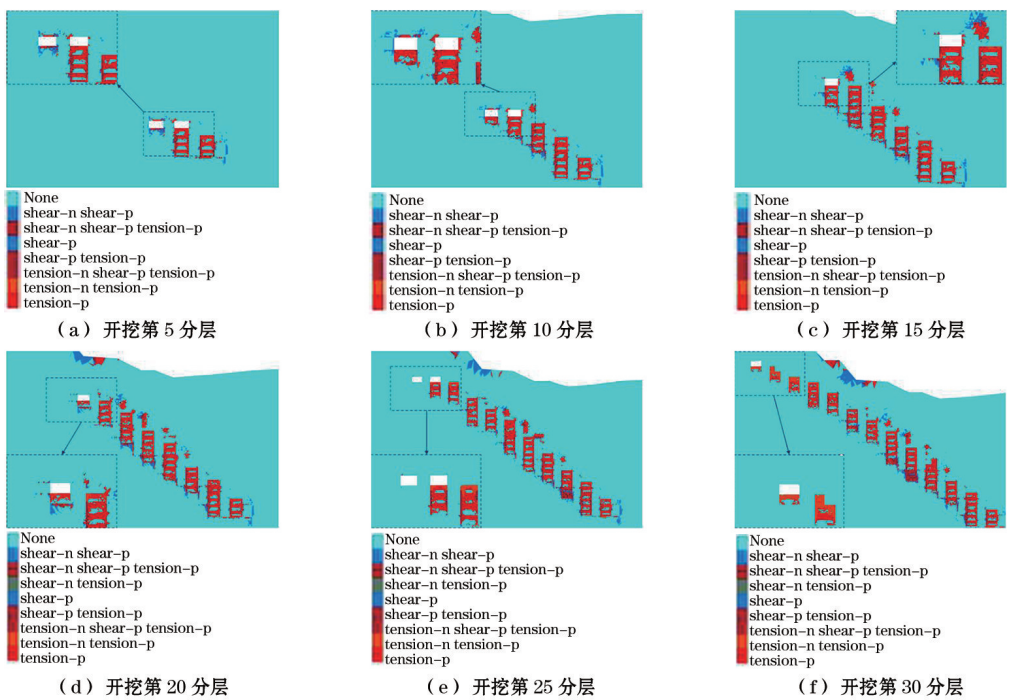
图 5　Ⅰ步骤条带开挖顶板塑性区分布云图

Fig.5　Distribution cloud maps of roof plastic zone in step Ⅰ strip excavation

由图 6 可知，Ⅱ步骤条带回采结束后，各分层顶板塑性区扩展范围大于Ⅰ步骤条带，塑性区集中出现在顶板中部及侧帮与顶板交界处。顶板中部破坏类型表现为拉伸破坏，侧帮与顶板交界处则表现为剪切破坏，破坏类型较Ⅰ步骤条带更为复杂。

3.2.2　顶板应力分布

由图 7 和图 8 可知，模拟Ⅰ步骤条带回采过程中，矿体下部岩层开挖导致原岩应力重新分布，条带顶板及侧帮交界处出现明显的应力集中现象。最大主应力在顶板及侧帮交界处表现为压应力，分布范围介于 1.8～7.0 MPa；最小主应力在顶板中部表现为拉应力，其值为 0.05～0.95 MPa。岩体所受应力大小未超过岩体的抗压强度及抗拉强度，条带顶板的应力状态相对稳定。

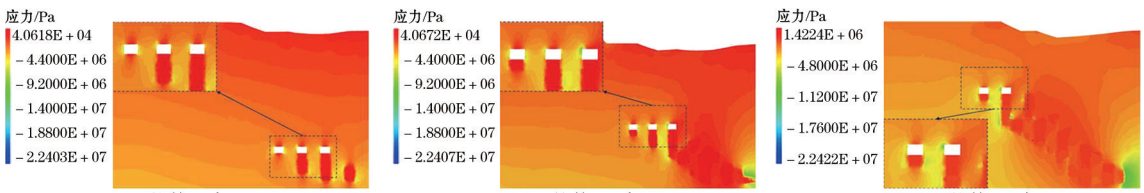


（a）开挖第 5 分层　（b）开挖第 10 分层　（c）开挖第 15 分层

（d）开挖第 20 分层　（e）开挖第 25 分层　（f）开挖第 30 分层

图 6　Ⅱ步骤条带开挖顶板塑性区分布云图

Fig.6　Distribution cloud maps of roof plastic zone in step Ⅱ strip excavation



（a）开挖第 5 分层　（b）开挖第 10 分层　（c）开挖第 15 分层

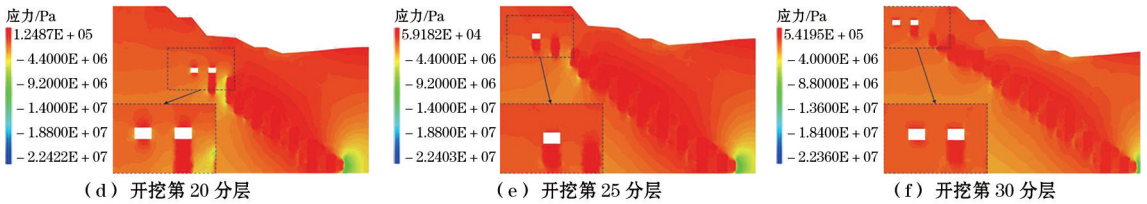


图 7 Ⅰ步骤条带开挖顶板最大主应力分布云图

Fig.7 Distribution cloud maps of maximum principal stress of the roof in step I strip excavation

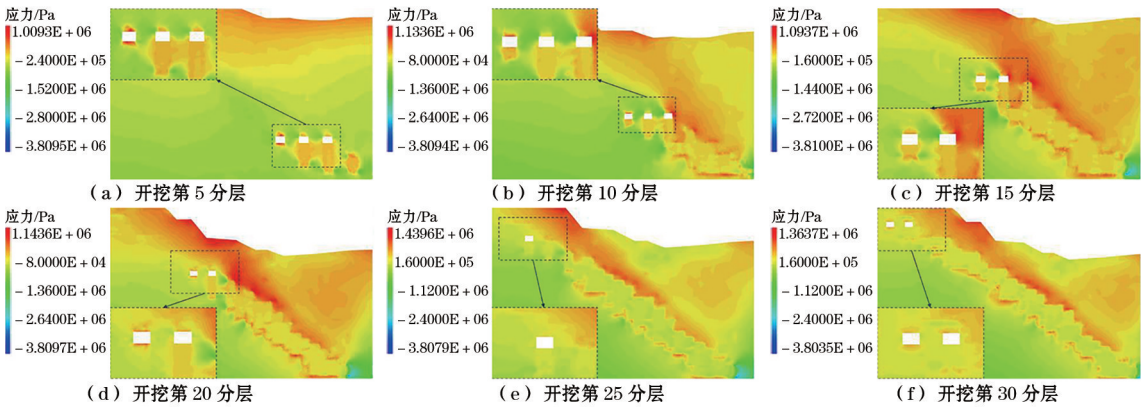


图 8 Ⅰ步骤条带开挖顶板最小主应力分布云图

Fig.8 Distribution cloud maps of minimum principal stress of the roof in step I strip excavation

由图 9 和图 10 可知,模拟Ⅱ步骤条带回采过程中,条带顶板及侧帮交界处出现明显的应力集中现象。最大主应力在条带顶板及侧帮交界处表现为压应力,其值为 0.7～6.2 MPa;最小主应力在顶板中部表现为拉应力,其值为 0.1～1.2 MPa,随着分层高度的增加,拉应力最大值所在位置逐渐向顶板侧部转移。由于Ⅱ步骤条带倾向跨度大于Ⅰ步骤条带,且Ⅱ步骤条带两侧为充填体,其强度较岩体低,因此,Ⅱ步骤条带顶板拉应力大于Ⅰ步骤条带顶板。

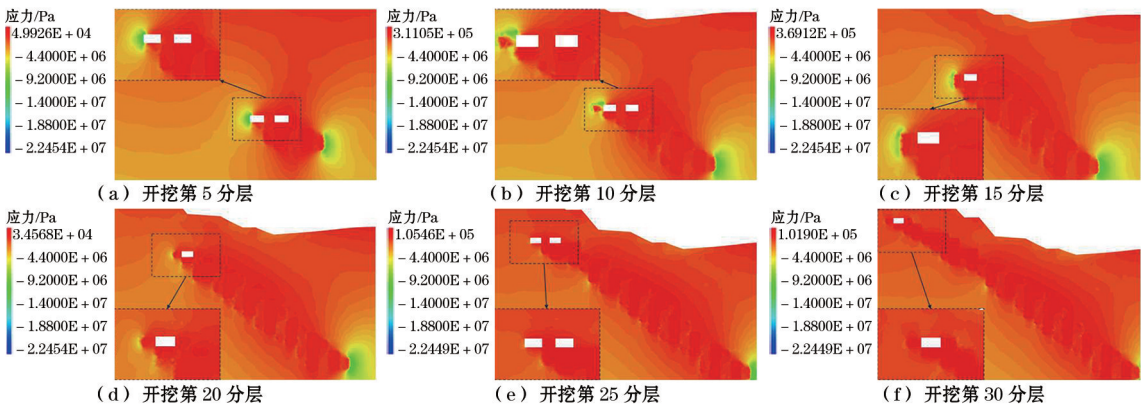
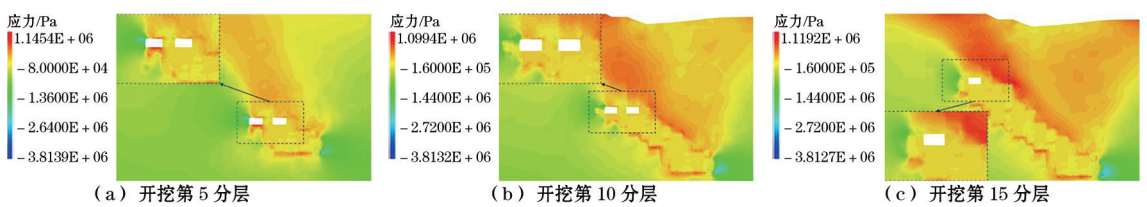
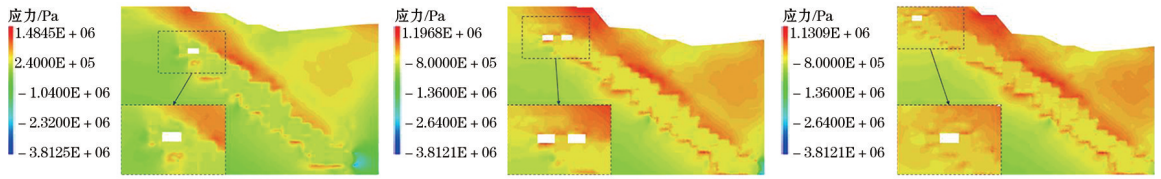


图 9 Ⅱ步骤条带开挖顶板最大主应力分布云图

Fig.9 Distribution cloud maps of maximum principal stress of the roof in step Ⅱ strip excavation





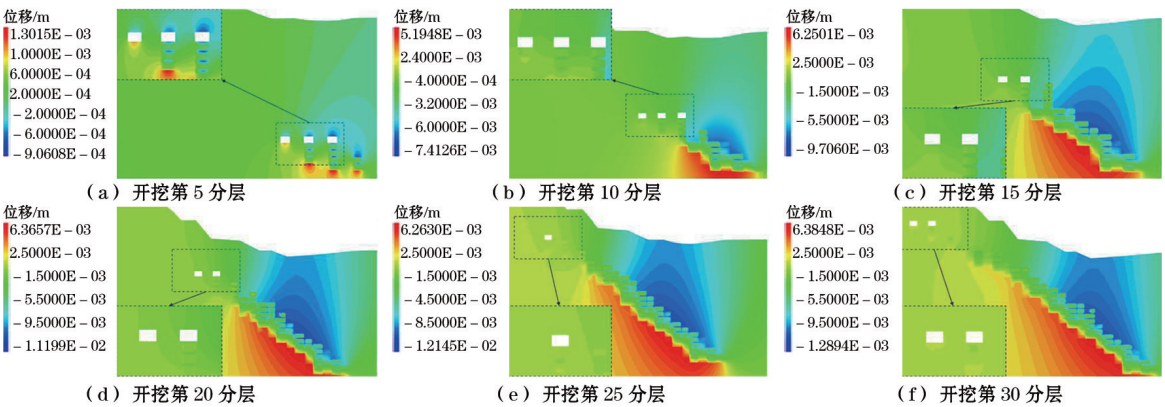
（d）开挖第 20 分层　（e）开挖第 25 分层　（f）开挖第 30 分层

图 10　Ⅱ步骤条带开挖顶板最小主应力分布云图

Fig.10　Distribution cloud maps of minimum principal stress of the roof in step Ⅱ strip excavation

3.2.3　顶板位移变化

由图 11 可知，Ⅰ步骤条带回采过程中，条带顶板位移呈显著的分区特征。第 5 分层至第 15 分层顶板位移呈拱形分布，且随着分层高度增加，拱形逐渐扩大，位移最大值由顶板中部向顶板侧部转移，顶板位移为 0.68～4.43 mm。由图 12 可知，Ⅱ步骤条带回采过程中，条带顶板位移与Ⅰ步骤条带分区特征一致，随分层高度的增加均由小拱形至大拱形发展，至第 15 分层后拱形逐渐消失，位移最大值由顶板中部向两侧转移，顶板位移为 3.28～5.35 mm。

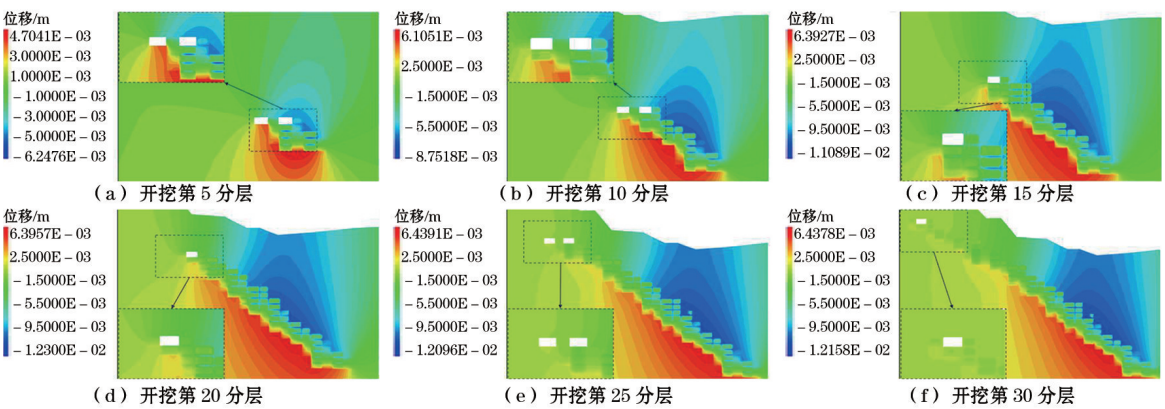


（a）开挖第 5 分层　（b）开挖第 10 分层　（c）开挖第 15 分层

（d）开挖第 20 分层　（e）开挖第 25 分层　（f）开挖第 30 分层

图 11　Ⅰ步骤条带开挖顶板位移

Fig.11　Roof displacement in step Ⅰ strip excavation



（a）开挖第 5 分层　（b）开挖第 10 分层　（c）开挖第 15 分层

（d）开挖第 20 分层　（e）开挖第 25 分层　（f）开挖第 30 分层

图 12　Ⅱ步骤条带开挖顶板位移

Fig.12　Roof displacement in step Ⅱ strip excavation

3.3　采场稳定性影响因素分析

落凼矿区挂帮矿体呈叠瓦状产出，采用两步骤条带式采矿法回采挂帮矿体时，由于地质条件的复杂性和矿体形态的不规则性，每个分层条带矿体在中段采高、走向跨度、倾向跨度以及采场距边坡的距离等参数上均存在显著差异，如图 13 所示。顶板塑性区的分布范围、顶板应力的集中程度以及顶板位移的大小和变化趋势，都与上述采矿参数密切相关。因此，本文统计了挂帮矿体回采过程中各分层参数，并对影响采场稳定性的相关因素进行了分析。



图 13 采场稳定性影响因素

Fig.13 Influencing factors of stope stability

3.3.1 顶板塑性区影响因素分析

由图 14 可知,随着中段采高的逐渐增加,两步骤条带顶板的塑性区范围均表现出先增大后减小的趋势。具体而言,在Ⅰ步骤条带开采过程中,顶板塑性区范围的初始均值为 0.7 m,随着中段采高的增加,顶板塑性区范围均值逐渐增加到 1.1 m,达到极值;然而,随着采高的继续增加,顶板塑性区范围的均值开始逐渐回落,最终减小至 0.2 m。这一过程反映了顶板塑性区对于中段采高变化的敏感性和非线性响应。在Ⅱ步骤条带开采过程中,顶板塑性区范围的变化趋势也呈现出类似的特征,其初始均值为 1.3 m,随着中段采高的增加,这一数值迅速攀升至 3.4 m,达到峰值;但随着中段采高的继续增加,顶板塑性区范围的均值开始逐渐下降,最终减小至 0.2 m。

值得注意的是,顶板塑性区范围的局部变化与条带的走向跨度和倾向跨度的变化有着相近的趋势,当条带的走向跨度和倾向跨度达到极值时,顶板塑性区范围也相应达到极值。这表明条带的几何尺寸对于顶板塑性区的形成和扩展具有重要影响。

此外,顶板塑性区范围的变化趋势与采场距边坡的距离呈负相关关系。当两步骤条带采场距边坡的距离达到最小时,顶板塑性区范围表现为区域内的最大值。这一发现揭示了边坡对于顶板塑性区的影响,即接近边坡可能会加剧顶板的塑性变形和破坏。

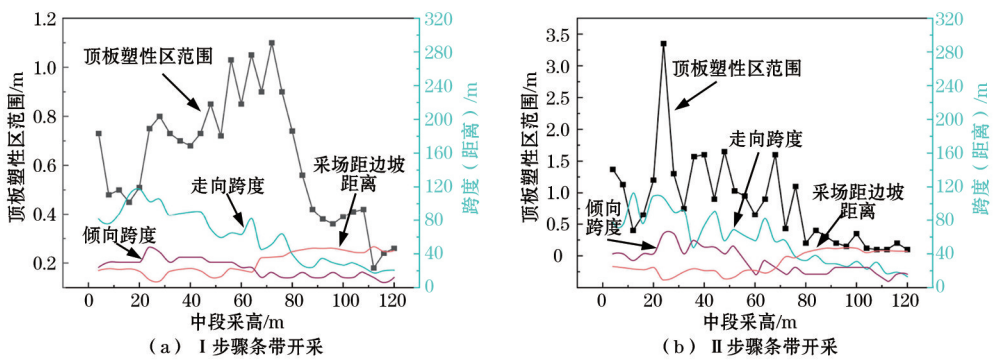


图 14 顶板塑性区与各影响因素之间的关系

Fig.14 Relationships between roof plastic zone and influencing factors

3.3.2 顶板应力影响因素分析

由图 15(a)和图 15(c)可知,Ⅰ步骤条带开采过程中顶板的拉应力及压应力均值随着中段采高的增加整体呈先增大后减小的变化趋势。具体而言,Ⅰ步骤条带顶板拉应力均值由最初的 0.70 MPa 增加至 0.95 MPa 而后减小至 0.35 MPa,顶板压应力由最初的 6.4 MPa 增加至 7.2 MPa 而后减小至 1.9 MPa。由图 15(b)和图 15(d)可知,Ⅱ步骤条带开采过程中,顶板拉应力均值整体上随中段采高的增加呈先增加后减小的趋势,由最初的 0.9 MPa 增加至 1.2 MPa 而后减小至 0.25 MPa;而顶板压应力则随中段采高的增加呈现逐渐减小的趋势,由最初的 6.2 MPa 减小至 1.5 MPa。

两步骤条带顶板拉应力及压应力局部变化与条带走向跨度及倾向跨度变化趋势一致,条带走向跨度及倾向跨度出现极值时,顶板拉应力及压应力均出现极值。条带顶板拉应力及压应力变化趋势与采场距边坡的距离呈现负相关关系。

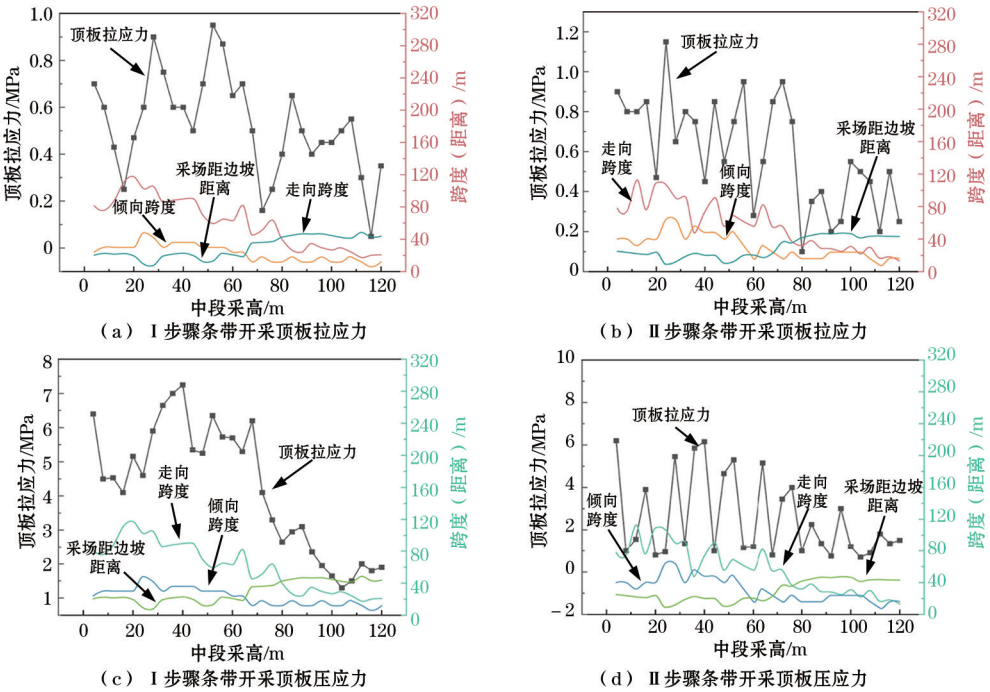


图 15　顶板应力与各影响因素之间的关系

Fig.15　Relationships between roof stress and influencing factors

3.3.3　顶板位移影响因素分析

如图 16 所示，两步骤条带顶板的位移均值随中段开采高度的增加整体上呈先增大后减小的变化趋势。Ⅰ步骤条带开采过程中，顶板位移由最初的 0.7 mm 增加至 4.5 mm，随后又减少至 0.2 mm；Ⅱ步骤条带开采过程中，顶板位移由最初的 3.3 mm 增加至 6.6 mm，随后又减小至 0.2 mm。

顶板位移的局部变化与条带走向跨度及倾向跨度的变化具有相似性，当条带走向跨度和倾向跨度达到极值时，顶板位移也达到极值。顶板位移的变化趋势与采场距边坡的距离呈负相关关系，当两步骤条带采场距边坡之间的距离达到最小值时，顶板位移达到最大值。

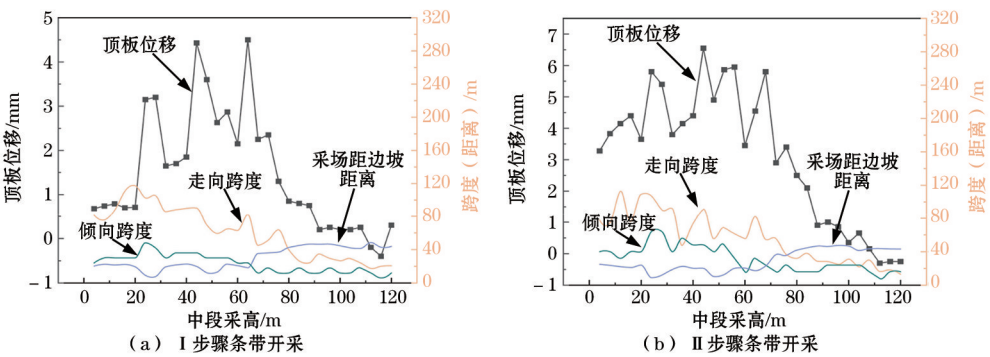


图 16　顶板位移与各影响因素之间的关系

Fig.16　Relationships between roof displacement and influencing factors

3.3.4　影响因素相关性分析

由上文可知，中段采高、走向跨度、倾向跨度及采场距边坡的距离等参数对采场稳定性有着重要影响。Ⅰ步骤条带中段采高分布于 4～120 m，走向跨度分布于 18～118 m，倾向跨度分布于 6～48 m，采场距边坡之间的距离分布于 8～47 m；对应顶板塑性区范围为 0.2～1.1 m，顶板位移为 0.2～4.4 mm，顶板拉应力为 0.05～0.95 MPa，顶板压应力为 1.30～7.25 MPa。Ⅰ步骤条带采场稳定性与中段采高、走向跨度、倾向跨度及采场距边坡的距离等因素的相关性分析如图 17(a)所示。

顶板塑性区与中段采高和采场距边坡的距离呈负相关，相关性程度为采场距边坡的距离大于中段采高；与走向跨度和倾向跨度呈正相关，相关性程度

为走向跨度大于倾向跨度。

顶板位移与中段采高和采场距边坡的距离呈负相关,相关性程度为采场距边坡的距离大于中段采高;与走向跨度和倾向跨度呈正相关,相关性程度为倾向跨度大于走向跨度。

顶板压应力与中段采高和采场距边坡的距离呈负相关,相关性程度为采场距边坡的距离大于中段采高;与走向跨度和倾向跨度呈正相关,相关性程度为走向跨度大于倾向跨度。

顶板拉应力与中段采高和采场距边坡的距离呈负相关,相关性程度为采场距边坡的距离大于中段采高;与走向跨度和倾向跨度呈正相关,相关性程度为倾向跨度大于走向跨度。

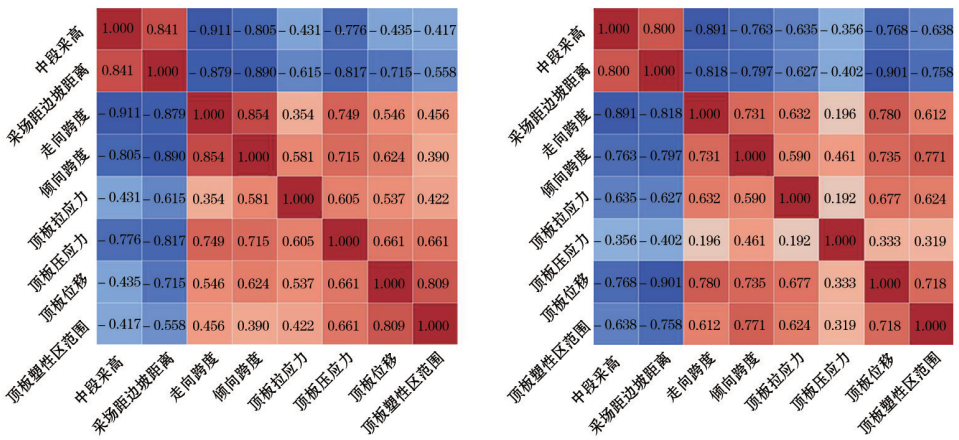
Ⅱ步骤条带中段采高分布于 4～120 m,走向跨度分布 13～113 m,倾向跨度分布于 8～64 m,采场距边坡之间的距离分布于 9～48 m;对应的顶板塑性区范围为 0.2～3.4 m,顶板位移为 0.2～6.6 mm,顶板拉应力为 0.1～1.2 MPa,顶板压应力为 0.7～6.2 MPa。Ⅱ步骤条带采场稳定性与中段采高、走向跨度、倾向跨度及采场距边坡的距离等因素的相关性分析如图 17(b)所示。

顶板塑性区与中段采高和采场距边坡的距离呈负相关,相关性程度为采场距边坡的距离大于中段采高;与走向跨度和倾向跨度呈正相关,相关性程度为倾向跨度大于走向跨度。

顶板位移:与中段采高和采场距边坡的距离呈相关,相关性程度为采场距边坡的距离大于中段采高;与走向跨度和倾向跨度呈正相关,相关性程度为走向跨度大于倾向跨度。

顶板压应力:与中段采高和采场距边坡的距离呈负相关,相关性程度为采场距边坡的距离大于中段采高;与走向跨度和倾向跨度呈正相关,相关性程度为倾向跨度大于走向跨度。

顶板拉应力:与中段采高和采场距边坡的距离呈负相关,相关性程度为中段采高大于采场距边坡的距离;与走向跨度和倾向跨度呈正相关,相关性程度为倾向跨度大于走向跨度。



(a) Ⅰ步骤采场 (b) Ⅱ步骤采场

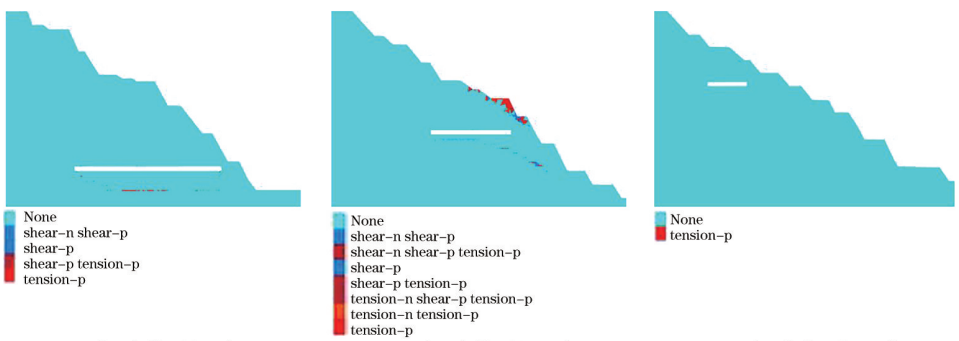
图 17 两步骤条带采场稳定性影响因素相关性分析

Fig.17 Correlation analysis of influencing factors on stope stability in two-step strip mining

3.4 挂帮矿回采边坡及露天运输系统稳定性分析

3.4.1 塑性区分布特征

为分析挂帮矿回采过程中边坡及露天运输系统的塑性区扩展范围,选取 5、15、25 分层的两步骤条带开挖工况,对边坡塑性区分布进行分析,如图 18 所示。



(a) Ⅰ步骤条带开挖 5 分层 (b) Ⅰ步骤条带开挖 15 分层 (c) Ⅰ步骤条带开挖 25 分层

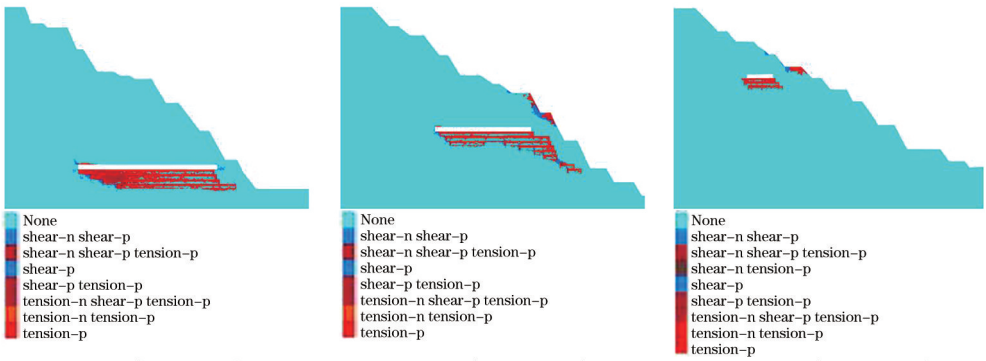


图 18　两步骤条带开挖边坡塑性区分布云图

Fig.18　Distribution cloud maps of slope plastic zone in two-step strip excavation

由图 18 可知，挂帮矿体回采过程中，露天边坡及运输系统塑性区范围整体趋势呈先增大后减小的趋势。Ⅰ步骤条带开挖 5 分层时，矿体边坡出现零星塑性区；Ⅱ步骤条带开挖 5 分层时，矿体边坡塑性区范围为 5.7 m。15 分层开挖时，矿体边坡塑性区范围最大，Ⅰ步骤、Ⅱ步骤条带开采时，边坡塑性区达 9.5 m。25 分层开挖时，Ⅰ步骤条带开采时边坡出现零星塑性区，Ⅱ步骤开采时边坡塑性区范围为 5.9 m。同时，边坡及运输系统塑性区与采场塑性区并未贯通，整体塑性区范围在 10 m 以下，对边坡稳定性影响较小。

3.4.2　应力

两步骤条带回采过程中，边坡最小主应力分布云图如图 19 所示。

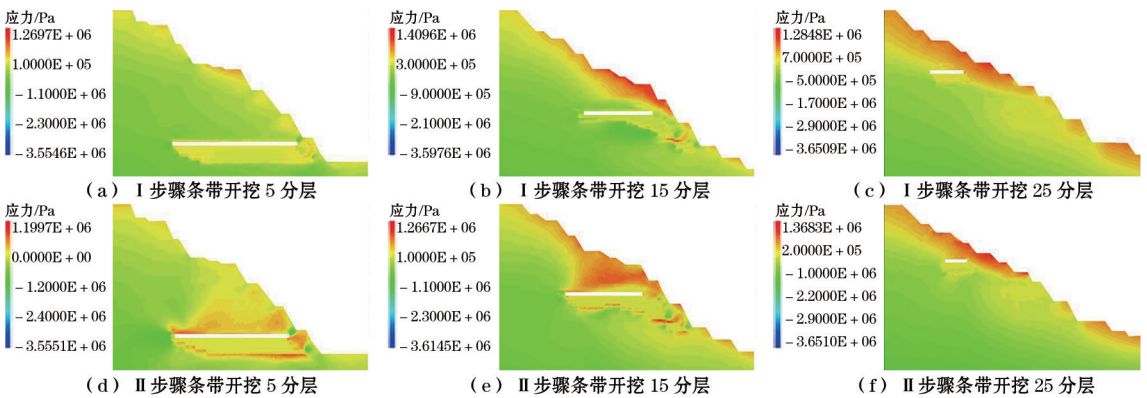


图 19　两步骤条带开挖边坡最小主应力分布云图

Fig.19　Distribution cloud maps of minimum principal stress of the slope in two-step strip excavation

由图 19 中可知，受挂帮矿体回采卸荷的影响，露天边坡内出现了明显的应力松弛区。两步骤条带开挖过程中，边坡台阶处出现了明显的应力集中，台阶处拉应力值为 0.2～0.9 MPa，个别台阶应力达到 1.1 MPa，边坡整体应力情况稳定，对边坡整体稳定性不会产生影响。

3.4.3　边坡位移变化

图 20 为两步骤条带开挖监测点位移变化曲线。可以看出，边坡内部开挖导致不同位置的边坡产生位移，且越接近开挖区域，边坡的位移越大。具体而言，监测点 1～5 的最大位移依次为 2.4 mm、4.1 mm、5.8 mm、5.8 mm、3.0 mm。此外，边坡位移随着高度的增加呈先增大后减小的变化趋势，且所有监测点的位移值均保持在较小范围内。

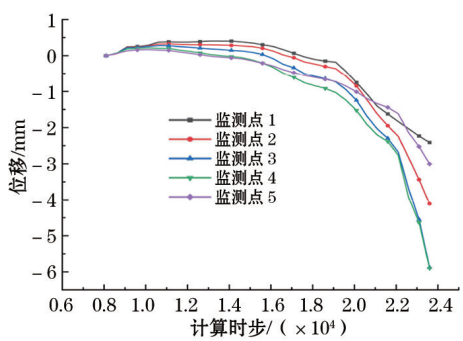


图 20　两步骤条带开挖边坡监测点位移变化曲线

Fig.20　Displacement variation curves of monitoring points of the slope during in two-step strip excavation

4 结论

针对落凼矿区西区挂帮矿体特殊赋存条件开展了采矿方法研究,并通过数值模拟对挂帮矿体回采过程进行模拟,分析了挂帮矿体回采过程中采场、边坡及露天运输系统的稳定性,得出以下主要结论。

(1) 结合落凼矿区西区挂帮矿体特殊的赋存特征,提出采用两步骤条带式上向水平分层充填采矿法回采挂帮矿体,可实现 600 t/d 的生产能力。该方法能在实现安全高效回采的同时,保障边坡及露天运输系统的稳定性。

(2) 基于 3Dmine-FLAC3D 数值模拟方法建立了落凼矿区西区挂帮矿体回采模型,模拟两步骤条带开采过程中采场、边坡及露天运输系统的稳定性。结果表明,两步骤条带开采过程中,顶板塑性区范围、应力及位移均较小,顶板最大塑性区范围为 3.4 m,最大位移为 5.35 mm,最大压应力为 7.0 MPa,最大拉应力为 1.2 MPa,所受应力未超过岩体强度,采场塑性区与边坡塑性区并未贯通,采场顶板完整性较高,稳定性较好。

(3) 相关性分析结果显示,顶板稳定性与中段采高、倾向跨度、走向跨度及采场距边坡的距离之间存在相关性,其与中段采高、采场距边坡的距离表现为负相关,且相关性较高;与倾向跨度及走向跨度表现为正相关,相关性较低。

参考文献(References):

[1] 刘艳章,张群,叶义成,等.挂帮矿开采低段高无底柱留矿嗣后充填采矿法[J].金属矿山,2014(12):40-44.
LIU Yanzhang, ZHANG Qun, YE Yicheng, et al. Pillarless ore-remaining subsequent fill mining with low stage height applicable to the exploitation of hanging wall ore [J]. Metal Mine,2014(12):40-44.

[2] 潘懿,王旭,张志军,等.深凹露天矿末期扩帮强化开采安全防控关键技术研究[J].矿业研究与开发,2022,42(8):47-53.
PAN Yi, WANG Xu, ZHANG Zhijun, et al. Study on the key technologies of safety prevention and control in the slope expansion and strengthening mining at the later stage in deep open pit mine [J]. Mining Research and Development, 2022,42(8):47-53.

[3] 李延超,王飞飞,姜安民,等.露天转地下开采引起露天边坡变形破坏特征及演化机理研究[J].矿业研究与开发,2024,44(7):72-79.
LI Yanchao, WANG Feifei, JIANG Anmin, et al. Deformation failure characteristics and evolution mechanism of open-pit slopes caused by the transition from open-pit to underground mining [J]. Mining Research and Development,2019,44(7):72-79.

[4] 万宇豪.基于岩块定向性的千枚岩堆积体边坡稳定性研究[D].成都:西南交通大学,2022.
WAN Yuhao. Study on the slope stability of phyllite bimrocks based on the orientation of blocks [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2022.

[5] 胡斌,李剑飞,李京,等.基于软弱夹层蠕变特性的边坡长期稳定性分析[J].矿冶工程,2023,43(4):6-11.
HU Bin, LI Jianfei, LI Jing, et al. Analysis of long-term slope stability based on creep characteristics of its weak intercalation [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(4):6-11.

[6] 张子祥,许雁超,张树伟,等.庙沟铁矿挂帮矿安全开采关键技术理论应用效果及存在问题探讨[J].矿业工程,2022,20(2):27-29.
ZHANG Zixiang, XU Yanchao, ZHANG Shuwei, et al. Problems of key technologies for safe mining in pit wall-connected ore body of Miaogou Iron Mine [J]. Mining Engineering,2022,20(2):27-29.

[7] 赵永岗,章发光,王云,等.挂帮矿开采对露天矿边坡稳定性的影响[J].内蒙古科技大学学报,2021,40(2):134-136.
ZHAO Yonggang, ZHANG Faguang, WANG Yun, et al. Influence of mining on slope stability of open pit mine [J]. Journal of Inner Mongolia University of Science and Technology,2021,40(2):134-136.

[8] 段永祥.石碌铁矿露天挂帮矿开采技术及工程实践[J].黄金,2020,41(12):44-48.
DUAN Yongxiang. Mining technology for hanging wall ore in Shilu Iron Mine and engineering practice [J]. Gold,2020, 41(12):44-48.

[9] 宋磊.白云鄂博铁矿露天共境界扩帮开采边坡稳定性分析[J].山西冶金,2024,47(10):112-114.
SONG Lei. Stability analysis of open-pit joint boundary expansion mining slope in Baiyunebo Iron Mine[J].Shanxi Metallurgy, 2024,47(10):112-114.

[10] 张丽,贾瑞敏,田琦.白云鄂博东矿境界外资源的开采方案研究[J].中国矿业,2020,29(2):112-116.
ZHANG Li, JIA Ruimin, TIAN Qi. Study on the mining scheme of resources outside the boundary of Baiyunebo East mine [J]. China Mining Magazine,2020,29(2):112-116.

[11] 马振翰,张治强.大孤山铁矿楔形转接过渡露天地下协同开采模式研究[J].矿业研究与开发,2021,41(9):12-16.
MA Zhenhan, ZHANG Zhiqiang. Study on wedge transition of open-pit and underground collaborative mining mode in Dagushan Iron Mine [J]. Mining Research and Development,2021,41(9):12-16.

[12] 范晓明,任凤玉,肖冬,等.具有深凹特征的改进挂帮矿诱导冒落开采方法[J].东北大学学报(自然科学版),2018,39(9):1321-1326.

FAN Xiaoming, REN Fengyu, XIAO Dong, et al. Improved induced caving mining method for hanging wall ore with deep concave features [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science),2018,39(9):1321-1326.

[13] 宫长亮,孙哲申,许译心,等.露天转地下挂帮矿崩落法开采边坡安全防控技术研究[J].现代矿业,2024,40(1):115-118.
GONG Changliang, SUN Zheshen, XU Yixin, et al. Safety prevention and control technology of slope by caving mining of hanging wall mine in open-pit to underground [J]. Modern Mining,2024,40(1):115-118.

[14] 徐帅,安龙,刘冬,等.高陡边坡下挂帮矿分区开采技术及其安全性分析[J].采矿与安全工程学报,2018,35(3):582-588.
XU Shuai, AN Long, LIU Dong, et al. Panel extraction and safety analysis of hanging wall orebody under high-steep slope [J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2018,35(3):582-588.

[15] 吴姗,宋卫东,杜建华,等.高陡边坡下充填法开采挂帮矿稳定性数值模拟与安全监测[J].采矿与安全工程学报,2013,30(6):874-879+885.
WU Shan, SONG Weidong, DU Jianhua, et al. Stability of numerical simulation and security monitoring of filling method to mining the hanging wall ore on high-steep slope [J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2013,30(6):874-879+885.

[16] 谭玉叶,杜建华,宋卫东,等.挂帮矿充填法开采对高陡边坡及采场围岩稳定性的影响[J].北京科技大学学报,2012,34(7):731-737.
TAN Yuye, DU Jianhua, SONG Weidong, et al. Effect of a filling method for mining the hanging wall ore on high-steep slope and surrounding rock stability [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing,2012,34(7):731-737.

[17] 毛瑞坤,谢盛青,赵东升.某露天铁矿采坑固结堆存协同挂帮矿安全高效开采研究[J].中国矿山工程,2023,52(3):13-18.
MAO Ruikun, XIE Shengqing, ZHAO Dongsheng. Study on safe and efficient miningon hanging wall of coordinating cemented storage in an open-pit iron mine [J]. China Mine Engineering,2023,52(3):13-18.

[18] 王平,张开新,徐钊.挂帮矿开采的相似模拟试验与安全性分析[J].金属矿山,2015(6):14-18.
WANG Ping, ZHANG Kaixin, XU Zhao. Similar simulation experiment and safety analysis during mining of hanging wall ore [J]. Metal Mine,2015(6):14-18.

[19] 刘形林,陈秋松,王道林.露天坑胶结充填对挂帮矿开采稳定性影响分析[J].黄金,2022,43(2):37-43.
LIU Xinglin, CHEN Qiusong, WANG Daolin. Analysis of the influence of cemented filling in open pit on the stability of hanging-wall ores extraction [J]. Gold, 2022, 43(2): 37-43.