

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.04.013

露天矿破碎站基坑控界爆破技术*

闫永富^{1,2}, 王文才¹, 刘占全², 孙盛³, 崔占军³

(1. 内蒙古科技大学 矿业与煤炭学院, 包头 014010; 2. 包钢钢联股份有限公司 巴润矿业分公司, 包头 014010;

3. 包钢集团公司 白云铁矿, 包头 014010)

摘要: 在深凹露天矿, 会使用运输成本较低廉的胶带运输系统。因此就需要在岩石台阶中, 利用爆破综合技术, 在围岩损伤最小的情况下, 控制开凿出符合胶带破碎机安装边界的基坑空间, 这一系列技术措施可以归纳为露天矿破碎站基坑控界爆破技术。将基坑爆破开挖设计为“一次预裂成型, 分层控制爆破开挖”的总施工方案。并利用能够克服“尺寸效应”的1:1全尺寸模拟爆破设计, 进行设计参数验证和优化。模拟爆破结果表明单耗为0.64 kg/m³时的炸药能量偏大, 导致爆堆抛掷量大, 预留岩壁受损严重, 且预裂孔超前主爆孔100 ms起爆的延时设计效果不佳, 预裂缝拉裂效果一般。根据模拟效果进行了施工方案及参数优化, 将炸药单耗降低至了0.55 kg/m³, 同时也对预裂孔线装药密度以及爆破网路延时进行了优化, 优化后的控界爆破效果要明显优于之前。

关键词: 露天矿; 破碎站基坑; 控界爆破; 立体设计

中图分类号: TD235.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2021)04-0089-07

Boundary Controlled Blasting Technology for Foundation Pit of Crushing Station in Open-pit Mine

YAN Yong-fu^{1,2}, WANG Wen-cai¹, LIU Zhan-quan², SUN Sheng³, CUI Zhan-Jun³

(1. College of Mining and Coal, Inner Mongolia University of Science and Technology,

Baotou 014010, China; 2. Baogang United Steel Barun Company, Baotou 014010, China;

3. Baiyunebo Iron Mine of Baotou Steel (Group) Corp, Baotou 014010, China)

Abstract: In deep open pit mine, a lower cost tape delivery system is often used. Therefore, it is necessary to use the control blasting technology to excavate a foundation space of crusher installation in the bench with minimum damage to the surrounding rock mass. The foundation blasting excavation was designed as a general construction plan of “one pre-cracking and controlled blasting excavation in layers”. The 1:1 full-scale simulation blasting design which can overcome the “size effect” was used to verify and optimize the design parameters. The simulated blasting results show that when the unit consumption of the explosive is 0.64 kg/m³, which resulted in a large explosive pile throw and serious damage to the reserved rock mass, and the pre-splitting blasting delay design effect of 100 ms ahead of time is not good. The pre-splitting blasting did not completely tear the rock mass. According to the simulation results, the construction plan and parameters were optimized, and the explosive unit consumption was reduced to 0.55 kg/m. At the same time, the line charge density of the pre-split holes and the blasting network delay were optimized, and the blasting effect was obviously improved.

Key words: open pit mine; foundation pit of crushing station; control blasting; three-dimensional design

收稿日期: 2021-06-04

作者简介: 闫永富(1989-), 男, 中级工程师、硕士, 露天矿控制爆破, (E-mail) yanyongfu0101@126.com。

基金项目: 包钢(集团)公司白云鄂博铁矿项目资助(SA010020190903B001)

露天矿破碎站基坑开挖工程是一项对爆破技术要求较高的工作, 需要制定切实可行的方案和选取科学合理的参数。国内外学者为了实现良好的基坑

爆破效果,进行了多角度的研究和试验。为了开挖施工的方便,将基坑划分为若干个纵向或者横向的施工区域^[1-4];为了严格控制爆破振动采用了电子雷管起爆系统进行逐孔起爆,并通过爆破振动情况调节选取了合适的爆破参数^[5,6];采用了三维影像建模的方式对开挖过程进行了形象的研究^[7]。由于爆破工作是一项不可逆且不允许容错的工作^[8],因此每一次的爆破都应当是精益求精的,应当在总结前人的成果的基础上选用最佳的设计方案和最合理的参数。在充分研究了破碎站基坑开挖区域的岩性特征及空间尺寸技术参数要求后,提出了一次预裂成型,分层开挖的施工方案,采用三维立体建模的方式模拟开采过程和验证参数设计的准确性。为了保持基坑壁原岩岩体的完整性,设计采用预裂控制爆破技术进行基坑边界的控界爆破。为了降低爆破振动,采用延时精度较为准确的数码电子雷管,严格控制单响爆破药量,达到降震、减震的目的。为了更为真实的检验设计的准确性和参数选取的合理性,采用1:1的真实比例进行现场模拟爆破,通过模拟爆破结果反馈调节设计方案和参数设计,保障最终破碎站基坑的成功控界爆破。

白云鄂博西矿是一座大型的深凹露天矿山,目前开采深度已经超过200 m,随着开采的延深,单一的汽车公路运输成本已经不符合经济合理运输距离的要求,因此正在筹建汽车-破碎站-胶带半连续运输系统。所建设的破碎站为半固定式破碎站系统,当第1站服务完毕以后,大部分运输胶带设施保持不动,破碎站主体设备向下延深至第2站位置。目前需要对破碎站第1站的空间位置进行爆破开挖,该区域岩性主要以白云岩为主,现场情况如图1。



图1 现场情况
Fig. 1 Scene picture

1 爆破设计

1.1 爆破方案

本次破碎站基坑的顶部开口处长26.4 m,宽20.6 m,基坑壁角度为 80° ,基坑深度为23 m。借鉴本矿山预裂控制爆破以及导向孔爆破等技术取得的

经验成果,设计采用预裂控制爆破技术对破碎站基坑进行分层爆破开挖。通过借鉴国内类似矿山的基坑爆破设计方案以及考虑采掘设备的作业能力以及爆破夹制作用的影响,基坑坡面采用1次预裂控制爆破成型,内部岩体设计分为2层进行穿爆和开挖,第1层设计高度为15 m,第2层为8 m,空间尺寸及开挖方案如图2。

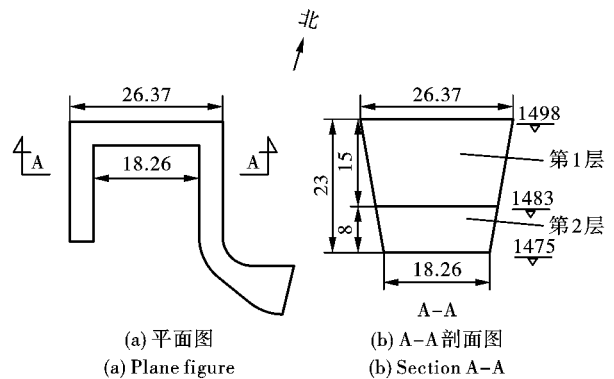


图2 空间尺寸及开挖方案(单位:m)

Fig. 2 Space size and excavation scheme (unit:m)

目前国内可以进行爆破设计的软件种类很多,并且各有特点。利用三维软件进行爆破设计可以形象直观的展现待爆体情况,可以查看炮孔空间布置是否合理,避免理论分析计算时由于空间想象能力不足而导致的爆破设计失误^[9]。基坑由于安装设备的特殊需要,所以空间尺寸并不是规则的几何形状,为了更好的进行爆破设计和便于采装,在进行爆破设计前对待爆破体按照分层开采的设计原则进行立体模型建模,模拟开挖过程,立体模型及开挖分层如图3,开挖方案信息汇总如表1。

1.2 控界爆破关键技术

破碎站基坑的预裂控制爆破与采场台阶预裂控制爆破最大的区别在于,预裂爆破的爆破振动波是由三个初始方向进行叠加,最终形成的爆破振动干扰关系复杂,应力波在狭窄空间内多次叠加,可能会减弱预裂破碎带阻挡、拦截应力波的难效果。另外由于基坑是一个半包围结构,侧壁坡面交汇处是一个复杂的斜交空间形态,该部分需要进行精细化爆破设计。交汇处的预裂孔不仅需要调整孔深,还需要对装药结构进行调整,为了保证最终的相邻基坑壁坡面准确交汇到设计的位置,在基坑壁空间交汇线处穿凿一个具有导向功能的角孔,角孔的作用是诱导两侧的预裂孔准确的在设计位置爆破致裂形成平整规则的空间交汇形态。

关于预裂控制爆破的参数选取有许多经验公式,但是进一步深入研究,戴俊等人关于爆破时粉碎圈和裂缝圈的研究和计算公式能更加全面的体现了岩石对爆破方式的反馈^[9]。

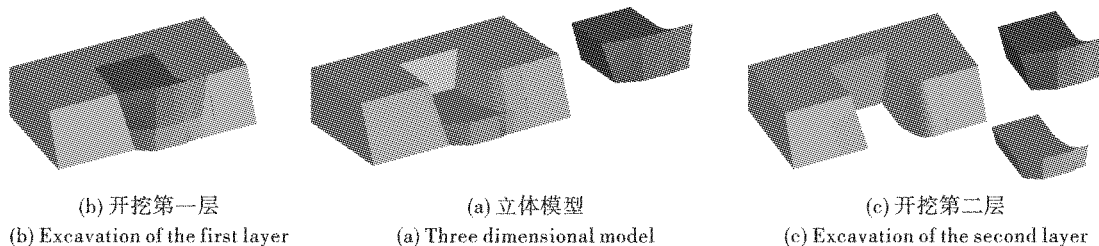


图 3 立体模型及开挖分层

Fig. 3 Three dimensional model and layered excavation

表 1 开采方案信息汇总

Table 1 Summary of mining scheme information

分层	开采深度/m	预报量/m ³	爆破方式	采掘方式
第一层	15	9444.5	预裂爆破 + 加强松动爆破	顶部货源回采,中下部货源甩货修路
第二层	8	4776.4	加强松动爆破	一次回采

理论上是通过炮孔直径和不耦合系数来确定药柱直径,但是由于炸药的使用习惯以及出于安全考虑对火工品的管制规定,一般矿山的炸药类型都比较单一,因此可以通过改变炮孔直径来调整装药不耦合系数。

借鉴现场经验综合考虑,初步认为在基坑预裂

控制爆破采取不耦合系数为 2.5 左右比较合适,炮孔间距按照文献[10]中关于预裂爆破孔距与孔径的选比关系为 $d = 8 \sim 12D$ 进行选取。考虑到基坑壁的空间交汇线的应力集中情况,起导向作用的角孔孔径选取 165 mm,立体设计情况如图 4,转角处预裂孔参数如表 2。

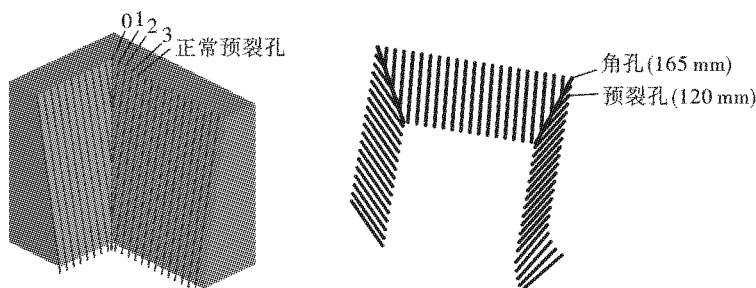


图 4 立体设计图

Fig. 4 Three dimensional design drawing

表 2 转角处预裂孔参数列表

Table 2 Parameter list of presplit hole at corner

孔号	承担任务	倾角/°	孔长/m
1 号	夹角预裂	80	5.2
2 号	夹角预裂	80	12.0
3 号	夹角预裂	80	18.8
0 号(角孔)	导向	76(基坑壁交线)	23.7
正常预裂孔	预裂成面	80	23.9

1.3 主爆区设计

主爆区的设计主要包括缓冲孔设计、主爆孔设计和掏槽孔设计三个部分,由于倾斜炮孔的最小抵抗线更加合理,所以本次设计的缓冲孔、主爆孔、掏槽孔均为倾斜炮孔,其中两侧的缓冲孔和主爆孔在倾向基坑中轴方向的同时向基坑开口方向倾斜,背侧缓冲孔和中部掏槽孔向基坑开口方向倾斜。

为了实现加强松动爆破的效果,中部掏槽的炮孔采用较大孔径的 165 mm 孔径,其他炮孔采用 120 mm 孔径炮孔。炮孔深度根据立体空间相互关系,在保证开孔位置合理的基础上,充分考虑炮孔底部的空间距离关系,尽可能的将爆破能量均匀地分布在待爆体中,第 1 层爆破设计如图 5,第 2 层爆破设计如图 6。

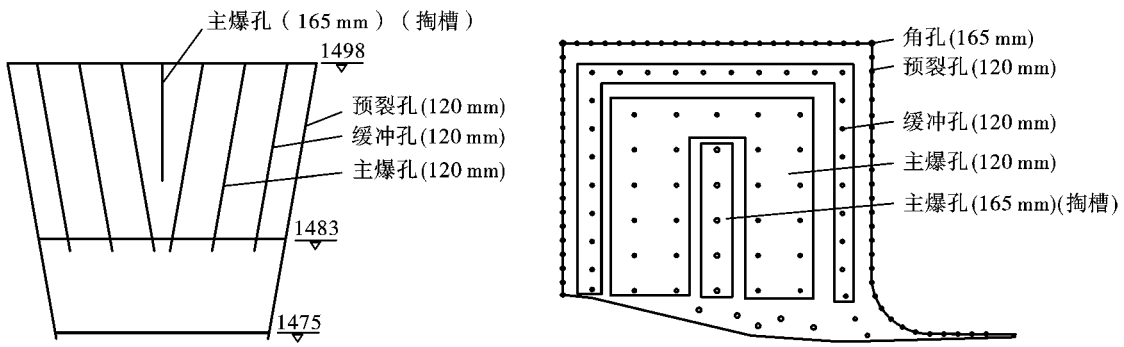


图5 第1层爆破设计(单位:m)

Fig. 5 Blasting design of the first layer(unit:m)

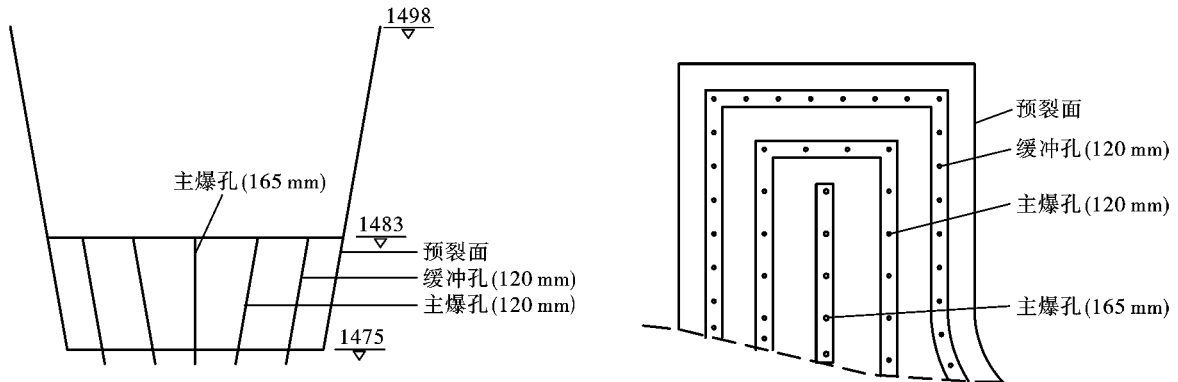


图6 第2层爆破设计(单位:m)

Fig. 6 Blasting design of the second layer(unit:m)

1.4 装药设计

由于采用的爆破技术为预裂控制爆破技术和加强松动爆破技术,所以预裂孔采用间隔不耦合装药;主爆区采用间隔耦合装药,缓冲孔和主爆孔按照加

强松动爆破设计进行装药设计,中部掏槽孔采用加强装药,第1层装药结构如图7。第2层装药结构与第1层装药结构类似,受篇幅限制不再列出。

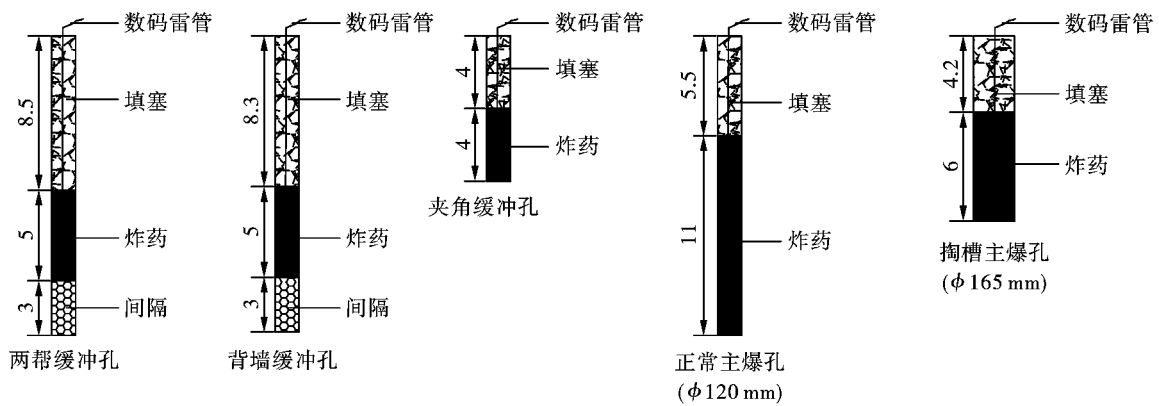


图7 第1层装药结构(单位:m)

Fig. 7 Charge structure of the first layer(unit:m)

1.5 起爆网路说明

为了最大限度的降低爆破振动,采用延时精度控制更为精确的数码电子雷管来实现精确的毫秒延期起爆网路^[11]。对于预裂爆破的起爆网路设计的关键是必须保证起爆可靠性,因此设计预裂网路时

采用双回路闭环起爆网路,即绑扎预裂药柱的支线导爆索与主线导爆索采用“T型结”,整个网路首尾闭环,即使中途某一点出现拒爆,起爆能也会沿着反方向再次经过该点将支路导爆索引爆。

2 工程应用实例

由于影响爆破工程质量的因素复杂多变,纯理论分析很难准确、全面的把控所有的因素,因此进行影响因素分析时,一般采用实验室小模型模拟实验的方法较多,但是由于“尺寸效应”的影响^[12],很难完全反映真实工程情况。本次工程在进行模拟分析时尽可能的克服“尺寸效应”,在南偏东50°方向,距离183 m的1470 m台阶处,选取了一处岩性与最终爆破区域岩性相似度较高,段高为15 m的位置进行了1:1尺寸的第1层爆破开挖模拟实验。

2.1 模拟爆破

检验预裂爆效果好坏的一个重要准则就是半壁

孔率,控制半壁孔率的最好技术措施就是选取合适的耦合系数进行装药爆破^[13]。由于理论计算和分析所得的不耦合系数为2.5左右,但是由于矿山现在只有45 mm直径的震源药柱可供使用,所以不耦合系数只能通过调整炮孔直径来实现。虽然原设计是采用孔径为120 mm的预裂孔和缓冲孔进行预裂爆破,但是考虑到模拟爆破的实验探索性和对比目的,设计将模拟爆区的一侧预裂控制爆破的孔径改为100 mm。以期望通过实验结果,观测判断何种孔径更有利于提高该种工况条件下的预裂控制爆破的半壁孔率,更有助于爆破控界效果,模拟爆破设计如图8,模拟爆破装药量如图9,模拟爆破起爆网路如图10。

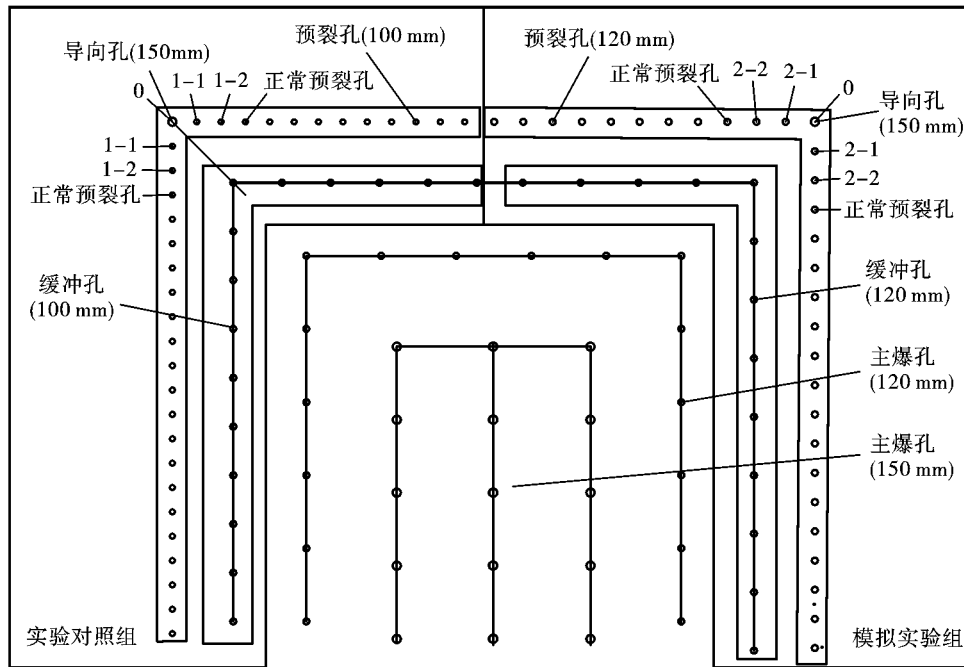


图8 模拟爆破设计

Fig. 8 Design drawing of simulated blasting

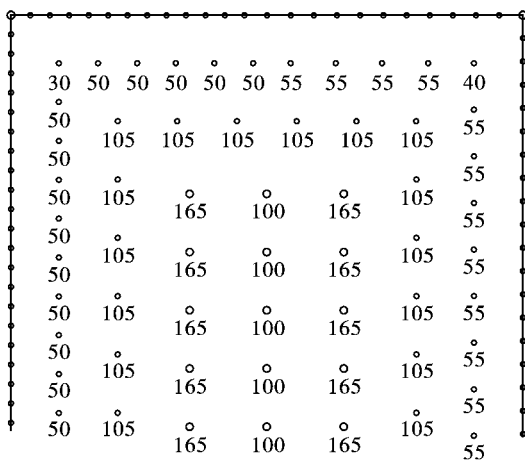


图9 模拟爆破装药量图(单位:kg)

Fig. 9 Charge diagram of simulated blasting(unit:kg)

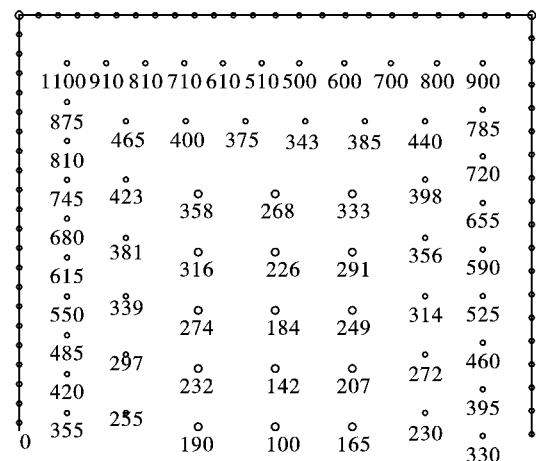


图10 模拟爆破起爆网路图(单位:ms)

Fig. 10 Network diagram of simulated blasting initiation(unit:ms)

2.2 爆破结果反馈参数调整

实现模拟爆破之后,发现爆破后有 1/2 爆堆被抛掷到了基坑开口前方,两侧塌落明显,但是后侧出现严重挂帮,且预裂孔的角孔区域塌落较差。经过采掘清理以后,发现基坑整体内部坡面岩体破坏严重,角孔控制区域空间形态较差,120 mm 孔径预裂孔模拟实验区域的边坡半壁孔率高于 100 mm 孔径区域,模拟爆破情况如图 11。

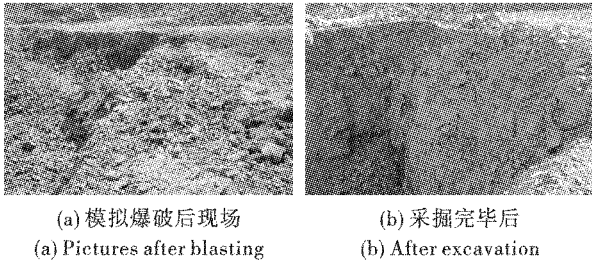


图 11 模拟爆破情况
Fig. 11 Simulation of blasting

模拟爆破的结果具有非常重要的意义,分析爆破现象可以提炼总结出改善爆破效果的技术。本次模拟爆破形成的基坑整体外形达到了设计的空间尺寸需要,没有超爆区域,通过综合评价,首先可以肯定该设计方案整体上是可行的。但是有以下 4 个相关问题点需要进行分析改善:施工问题、爆堆货源质量问题、控界效果问题、预裂坡面问题。利用树状思维导图的分析方法,将模拟实验爆破暴露出的问题进行全面分析总结,确定导致问题的主要原因,并制定了相应的改善措施,最终形成了 1 套完善的破碎站基坑控界立体综合爆破技术,模拟爆破优化措施思维导图如图 12。

2.3 最终爆破实施

根据模拟实验结果分析优化爆破设计后,经过精细组织穿爆和采掘,最终形成的基坑在空间尺寸外形方面达到了预期效果,且坡面岩体完整度较高,半壁孔率在 85% 以上,最终基坑现场情况如图 13。

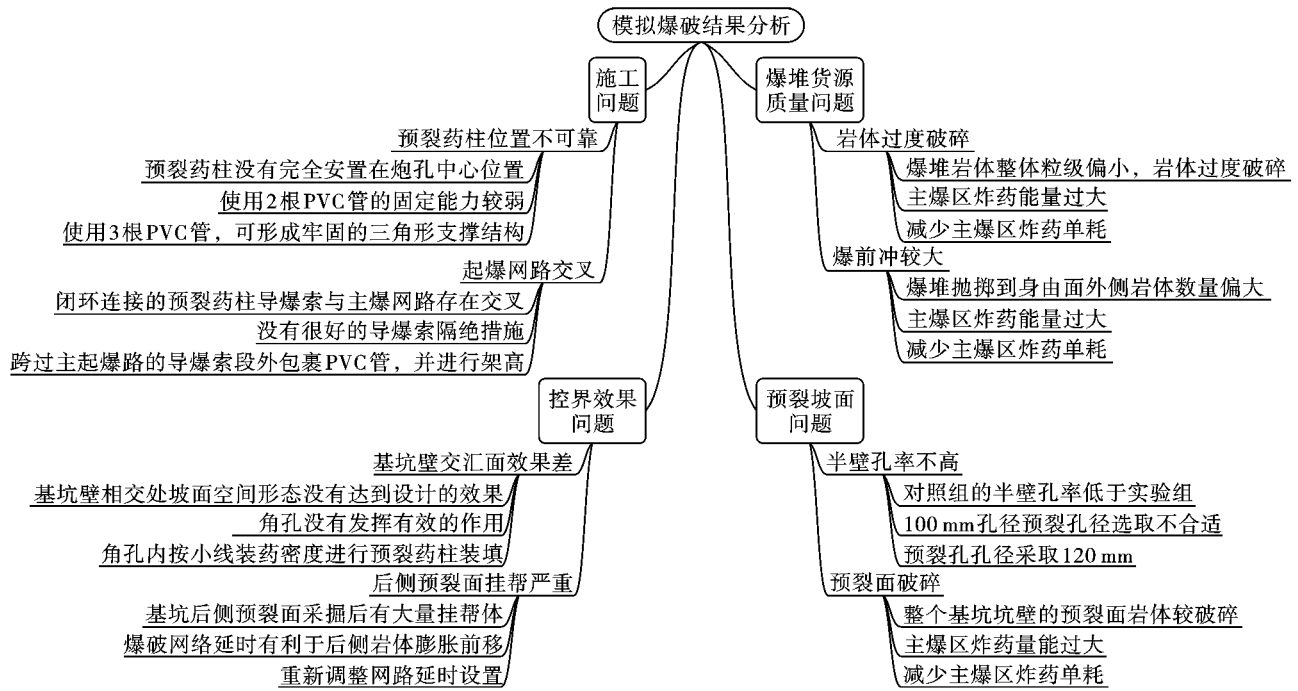


图 12 模拟爆破优化措施思维导图
Fig. 12 Optimization measures of simulated blasting based on mind map

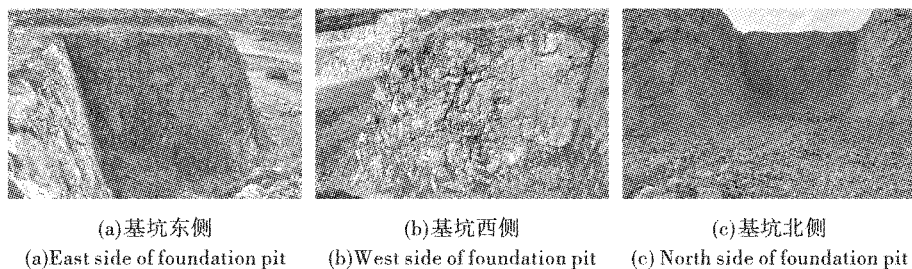


图 13 最终基坑现场情况
Fig. 13 Site condition of final foundation pit

3 总结

本次露天矿破碎站基坑控界爆破技术在包钢巴润分公司西端帮岩石胶带破碎站基坑开挖中取得了良好的效果,这得益于合理的方案设计和真实比例的模拟爆破。本次露天矿破碎站基坑控界爆破可以总结为:一次预裂成型,分层采装是比较合理的岩石基坑开挖处置方案;利用全区双倾斜方向的不等深炮孔可以更加合理的分配炸药能量,均衡抵抗线;利用三维模型的可视化,可以改进常规二维设计时的思维缺陷;利用数码电子雷管可以实现更为精准和灵活的起爆延期时间设计,便于控制爆破振动对预留岩壁的损伤;通过1:1的现场模拟实验可以获得最为真实的预期爆破效果,是进行参数优化的重要途径。通过本次成功案例可以为其他类似的露天矿岩石基坑开挖施工提供爆破设计思路,和成功案例借鉴的作用。

参考文献(References)

- [1] 朱刚,孙永,高磊.厄瓜多尔米拉多铜矿岩质深基坑爆破施工方案设计[J].现代矿业,2018,34(6):102-104,108.
- [1] ZHU Yong-gang,SUN Yong,GAO Lei. Design of the blasting construction scheme of bedrock deep Pit of Mirador Copper Mine in Ecuador [J]. Modern Mining, 2018, 34(6):102-104,108. (in Chinese)
- [2] 刘国军.复杂环境下深基坑砂岩爆破[J].工程爆破,2021,27(1):74-78.
- [2] LIU Guo-jun. Sandstone blasting of deep foundation pit under complex environment [J]. Engineering Blasting, 2021, 27(1):74-78. (in Chinese)
- [3] 林博闻,舒大强,陈明,等.扩机工程基坑开挖爆破振动效应及控制措施研究[J].爆破,2019,36(4):56-61.
- [3] LIN Bo-wen,SHU Da-qiang,CHEN Ming, et al. Blasting vibration effect and vibration control measure of foundation pit excavation in installed capacity expansion project [J]. Blasting, 2019, 36(4):56-61. (in Chinese)
- [4] 孙永,张文锡,任书明,等.城区地铁车站基坑分块爆破控制技术[J].工程爆破,2018,24(6):28-32.
- [4] SUN Yong,ZHANG Wen-xi,RENG Shu-ming, et al. Block blasting control technology of foundation pit of subway station in urban area [J]. Engineering Blasting, 2018, 24(6):28-32. (in Chinese)
- [5] 李玉景,赵文,赵光荣,等.闹市区超深基坑开挖的控制爆破技术[J].工程爆破,2019,25(5):41-45,51.
- [5] LI Yu-jing,ZHAO Wen,ZHAO Guang-rong, et al. Controlled blasting technique for ultra-deep foundation pits in downtown area [J]. Engineering Blasting, 2019, 25(5):41-45,51. (in Chinese)
- [6] 余敏,林从谋,常方强,等.岩质深基坑爆破振动放大效应测试研究[J].爆破,2017,34(4):27-32,65.
- [6] YU Min,LIN Cong-mou,CHANG Fang-qiang, et al. Research on amplification effect of blasting vibration in rock deep foundation pit [J]. Blasting, 2017, 34(4):27-32,65. (in Chinese)
- [7] 王吉亮,施炎,周炳强,等.逐层开挖工程整体三维影像模型构建方法[J].吉林大学学报(地球科学版),2018,48(5):1589-1595.
- [7] WANG Ji-liang,SHI Yan,ZHOU Bing-qiang, et al. Method of overall 3d image model construction for step by step excavation engineering [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2018, 48(5):1589-1595. (in Chinese)
- [8] 汪旭光.爆破设计与施工[M].北京:冶金工业出版社,2012:248-257.
- [8] WANG Xu-guang. Blasting design and construction [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012:248-257. (in Chinese)
- [9] 任占营.露天矿爆破智能设计与模拟优化系统研发与应用研究[D].北京:中国矿业大学,2016.
- [9] RENG Zhan-ying. Research on the development and application of open pit mine intelligent design and simulative optimization system [D]. Beijing: China University of mining and Technology, 2016. (in Chinese)
- [10] 谢烽,韩亮,刘殿书,等.基于叠加原理的隧道爆破近区振动规律研究[J].振动与冲击,2018,37(2):182-188.
- [10] XIE Feng,HAN Liang,LIU Dian-shu, et al. Vibration law analysis for a tunnel's field near blasting based on waveform superposition theory [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(2):182-188. (in Chinese)
- [11] 叶春雷,郑德明,戴春阳,等.复杂环境下数码电子雷管在土石方爆破工程中的应用[J].爆破,2019,36(4):76-79,95.
- [11] YE Chun-lei,DENG De-ming,DAI Chun-yang, et al. Application of digital electronic detonator in soil-rock blasting engineering in complex situation [J]. Blasting, 2019, 36(4):76-79,95. (in Chinese)
- [12] 金浏,蒋轩昂,杜修力.轻骨料无腹筋混凝土梁剪切破坏及尺寸效应:细观模拟[J].工程力学,2020,37(7):57-67.
- [12] JIN Liu,JIANG Xuan-ang,DU Xiu-li. Shear failure and size effect of lightweight aggregate concrete beams without web reinforcement: a meso-scale study [J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(7):57-67. (in Chinese)
- [13] 祁建东.西石门铁矿深部巷道围岩破坏机理及控制技术[D].北京:北京科技大学,2018.
- [13] QI Jian-dong. Study on failure mechanism and control technology of surrounding rock of deep tunnel in Xishimen Iron Mine [D]. Beijing: Beijing University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)