

· 专题综述 ·

# 露天金属矿采选联合优化的研究进展

张长奎<sup>1</sup> 贾建军<sup>1</sup> 冯 春<sup>2,3</sup> 乔继延<sup>2,3</sup> 郭汝坤<sup>2,3</sup> 李世海<sup>2,3</sup>

(1. 鞍钢矿业爆破有限公司, 辽宁 鞍山 114046; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100190;  
3. 中国科学院流固耦合系统力学重点实验室, 北京 100190)

**摘 要** 对采选联合优化的科学内涵及发展历程进行了论述,指出采选联合优化的理念是将采矿与选矿进行综合考虑,达到总成本最优。阐述了计算机模拟分析技术在采选联合优化中所发挥的关键作用,并分项论述了各类模拟分析技术的用途及特点。总结了爆破参数对下游破磨效率的影响规律,发现炸药单耗起着决定性的作用,而台阶高度、炸药爆速等也对机械破磨效率存在一定的影响。展望了采选联合优化的发展趋势,指出了物联网技术及海量数据深度分析技术将在未来采选联合优化设计中发挥重要作用。

**关键词** 露天矿 采选联合 以爆代破 破磨效率 单耗

中图分类号 TD235 文献标志码 A 文章编号 1001-1250(2017)-07-001-07

## Study Advances of Comprehensive Optimization of Mining and Mineral Processing in Open-pit Metal Mine

Zhang Changkui<sup>1</sup> Jia Jianjun<sup>1</sup> Feng Chun<sup>2,3</sup> Qiao Jiyan<sup>2,3</sup> Guo Rukun<sup>2,3</sup> Li Shihai<sup>2,3</sup>

(1. Mining Blasting Co., Ltd. of An-steel, Anshan 114046, China; 2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract** The scientific connotation and development courses of the comprehensive optimization of mining and mineral processing are discussed. The concept of the comprehensive optimization of mining and mineral processing is conducting comprehensive consideration of mining and mineral processing, to minimize the total costs of them. The key functions of computer simulation and analysis techniques in the comprehensive optimization of mining and mineral processing are analyzed in detail, and the functions and characteristics of the computer simulation and analysis techniques are discussed respectively. The influence regularities of blasting parameters to downstream grinding efficiency is summarized, it is show that the explosive unit consumption plas a key role, and the mechanical crushing and grinding efficiency can be affected by the bench height and explosive detonation velocity to some extent. Based on the above analysis results, the development trend of the comprehensive optimization of mining and mineral processing are discussed, it is indicated that important role in the further of the comprehensive optimization design of mining and mineral processing can be played by the Internet of things and depth analysis technique of mass data.

**Keywords** Open-pit mine, Comprehensive of mining and mineral processing, Crushing substituted by blasting, Efficiency of crushing and grinding, Unite consumption

国际上最早关于采矿方面的著作是由 Georgius Agricola 于 1556 年所著的《De Re Metallica》,该书首次提出了矿业工程包含采矿、选矿及冶炼等 3 个阶段。在此后的数百年里,上述 3 个阶段的生产技术及工艺流程发生了天翻地覆的变化,各个阶段的技术人

才也逐渐趋向于专业化,人才培养方面则按照上述 3 个阶段分别设置了采矿工程、选矿工程及冶金工程等 3 个专业。

随着技术及人才的专业化,各阶段之间的屏障逐渐加大,彼此之间的交互也逐渐减少。因此,采矿工

收稿日期 2017-04-03

基金项目 国家重点研发计划项目(编号:2016YFC0801600),鞍钢矿业集团“基于采选总成本的爆破技术优化研究”项目(编号:2016-科 A07-2)。

作者简介 张长奎(1967—),男,高级工程师。通讯作者 冯 春(1982—),男,高级工程师。

工程师的主要目的演变为用最低的成本获得选矿所需的矿石块度,却并不思考矿石块度对后续选矿效率及选矿能耗的影响;而选矿工程师则想尽办法用最低的能耗提取出最多的有用矿物,但却不会将采矿与选矿进行综合考虑,提出采选总成本最低的工艺流程及相关控制指标。

大约在 20 世纪 90 年代初,国外率先提出了基于采选总成本的联合优化理念,并将该理念称之为 Mine to Mill (M2M),即从采矿到磨矿。澳大利亚冶金矿业协会(AusIMM)、澳大利亚优化资源开采合作研究中心(CRC ORE)、昆士兰大学可持续资源研究所的 JKMRRC 中心,是 M2M 的主要倡导者<sup>[1]</sup>。

一般而言,从矿石到最终可销售的产品,需要经历钻孔、爆破、铲装、运输、破碎、碾磨、提纯等多个阶段。其中,钻孔及爆破是上述生产链条中的重要环节,爆破后的破裂块度、爆堆形态、松散度、碎块内的损伤程度等将直接影响下游各工序的生产效率。因此,开展采选联合优化,关键是根据采场的地层环境、岩石性质、构造发育情况、炸药性能等因素,通过调整、优化爆破参数及装药结构,使采选的总成本最优。

本研究的主体共包含 4 个部分,首先论述采选联合优化的科学内涵及发展历程,而后详细介绍实施采选联合优化时所用到的计算机模拟分析技术及软件,接着通过相关工程实例说明降低采选总成本的主控因素,最后给出采选联合优化的发展趋势。

## 1 采选联合优化的内涵及发展历程

早在 1998 年由 AusIMM 组织的 M2M 会议上,Scott 等<sup>[1]</sup>便提出了采选联合优化的思想,并指出统筹设计时需要关注如下几点:矿体特征、经济优化、矿石到产品的全链条跟踪、矿石特征对开采效率及破磨效率的影响、现场实验的重要性及必要性。随后,Scott 等<sup>[2]</sup>对 M2M 进行了较为全面的阐述,并指出 M2M 涉及从采场矿石破碎过程到最终选矿提纯过程的全链条优化。

Adel 等人<sup>[3]</sup>提出了类似的概念,认为 M2M 是一个对采矿到磨矿进行整体优化设计的方法,它的目的是用最少的能量消耗实现矿物破碎粉化的全过程。McCaffery 等人则指出<sup>[1,4]</sup>,M2M 是一项需要长期坚持的日常工作,需要对采矿工序及破磨工序进行长期记录,进而掌握矿体性质及采矿参数对破磨产量、生产效率及成本消耗的影响规律。

国内关于采选联合优化的研究主要偏向于地下采矿,并将其称之为地下采选一体化。地下采选一体化,即通过将采矿过程及选矿过程全部集中于地下,实现矿石的单一提升和废石在井下的内部转化,从而

达到开采成本与能耗的“双降”。邵安林<sup>[5]</sup>对地下采选一体化系统的概念、构成、适用条件、应用案例及未来发展趋势等进行了详细论述;孙豁然等<sup>[6]</sup>则根据本溪某深部铁矿提出了具体的地下采选一体化实施方案;苑占永等<sup>[7]</sup>则对地下采选一体化实施过程中采充平衡的临界品位进行了深入研究。综上,地下采矿中的采选一体化设计,更偏向于空间位置的一体化,通过在地下设置选矿系统,实现了矿岩混合体的随采、随选、随填,从而提升了采选效率,节省了采选成本。然而,国内关于露天矿采选联合优化的研究较少,仅有部分学者考虑了爆破对后续机械破磨效率的影响,并提出了“以爆代破”、“以破代磨”等理念,并在一些矿山开展了少量的试验性研究。

总体而言,采选联合优化的发展可以分为 3 个阶段<sup>[1]</sup>:第一阶段(1990—2000)着重采用计算机模拟的方法研究 M2M 在减少能耗及降低综合成本方面的潜力;第二阶段(2000—2010)以不同类型矿区大量的应用案例为特点,模拟方面则将采矿爆破中的块度模型纳入了 M2M;第三阶段(2010 年至今)借助信息技术及物联网技术,重点关注现场海量地质数据及选矿数据的利用,将所获得的大量数据纳入分析模型中不断反馈迭代,对 M2M 的方案进行动态调整,从而指导生产计划。

## 2 采选联合优化中的关键技术

M2M 的主要理念是将采矿与选矿进行综合考虑,达到总成本最优。为了更好地实现这一目的,需要借助一系列的技术及手段。其中,计算机模拟分析技术在爆破的优化设计、爆破效果的评价、破磨过程的控制及矿岩块度的实时监控等方面发挥着重要的作用,是采选联合优化中的关键技术。

### 2.1 爆破优化设计软件

爆破优化设计软件是进行爆破设计及爆破方案预演的有效手段;爆破工程师可以借助此类软件进行复杂地形下的炮孔设计及起爆网络设计,预先查看爆破参数及起爆网络的合理性;国外的部分软件通过与数码雷管的联合,可直接实现数字起爆;部分优化设计软件更兼有爆破过程模拟、爆破震害分析及爆破效果的简易预测功能。现就国内外比较典型的几款爆破优化设计软件进行简要介绍。

SHOTPlus<sup>[8]</sup>是由澳大利亚的澳瑞凯(Orica)公司研发的适用于矿山日常生产设计的爆破优化设计软件,该软件目前已经发展到了第 5 代(SHOTPlus 5)。SHOTPlus 5 实现了爆破的全三维设计,用户可根据需要设置三维爆破区域,指定炮孔尺寸及位置,选择炸药类型及装药方式,设计起爆网络及延时分配,通

过与电子起爆系统 i-kon 的关联,实现数字起爆;此外,SHOTPlus 5 还提供了联网分析爆破振动的功能。

JKSimBlast<sup>[9]</sup>是由昆士兰大学可持续资源研究所研发的一款用于矿山爆破开采设计及信息管理方面的通用软件。该软件适用于将爆破工程师日常的爆破作业标准化,并将爆破工程师的爆破经验量化。该软件可为爆破工程师提供爆破辅助设计、起爆过程模拟及爆破效果的简易预测等功能。该软件包含了用于台阶爆破的 2DBench、用于地下爆破的 2DRing、用于隧道爆破的 2DFace、用于爆破分析的 2DView、用于时间分析的 TimeHEX 及用于爆破管理的 JKBMS 等多个模块。

BLAST-CODE<sup>[10-11]</sup>是由北京科技大学璩世杰教授团队研发的一款爆破设计软件,该软件的主要特点是可以综合考虑多种复杂因素对爆破效果的影响,并据此进行台阶爆破的计算机自动设计或人机交互设计。该软件可综合考虑的复杂因素包括:爆区地形、台阶自由面条件、矿岩物理力学性质、地质结构构造特征、炸药爆炸性能等。优化设计完毕后,该软件可自动生成爆破指令书、炮孔布置图、爆破参数计算表等。

## 2.2 爆破效果分析预测技术

数值模拟是开展爆破效果分析的主要手段,国内外的专家学者对数值模拟技术在爆破工程中的应用开展了大量的研究,取得了丰硕的成果。其中,比较典型的可用于露天矿爆破分析的数值模拟方法及软件包括来自澳大利亚澳瑞凯公司的 MBM 及 DMC 软件,来自美国 ITASCA 公司的 Blo\_Up 软件,以及来自中国科学院力学研究所的 CDEM 软件。

MBM (Mechanistic Blasting Model) 是有限元与块体离散元相结合的数值模拟软件,目前该软件仅能计算二维问题。该软件的主要功能包括爆破诱发岩体损伤、破裂、破碎过程的分析,爆破块度的分析,抛掷过程分析,以及爆堆形成过程的分析等<sup>[12-14]</sup>。该软件的第一版由 Minchinton、Lynch 在 ICI 公司研发<sup>[15]</sup> (Minchinton 等,1997)。

DMC (Distinct Motion Code) 是基于颗粒离散元的露天矿爆破效果数值模拟软件,目前该软件可以计算二维及三维爆破问题<sup>[16-17]</sup>。DMC 的主要功能包括:模拟抛掷、堆积过程,给出爆堆形状,预测矿岩分选爆破的效果等。该软件的早期版本来自美国 Sandia 实验室,由 Taylor 及 Preece 在 1989 年完成了二维代码的开发<sup>[18-20]</sup>;Preece 后来就职于 Orica,研发形成了三维 DMC 代码,并于 2015 年成功应用于抛掷爆破的模拟。

Blo\_Up (Blast Layout Optimization Using PFC3D) 主要由 ITASCA 公司进行研发,是 HSBM (Hybrid Stress Blast Model) 项目研究成果的集中体现<sup>[21-24]</sup>。HSBM 是一个工程爆破全过程的数值模拟框架,可以对爆破破岩的全过程进行三维全尺度的模拟。它将理想/非理想爆轰模型与岩土力学模型相耦合,早期的力学模型采用颗粒流 (PFC3D),后期采用格子模型 (Lattice model)。HSBM 项目起始于 2001 年,项目成员包括 ITASCA 软件公司、昆士兰大学、帝国理工大学、剑桥大学等,项目的赞助商包括 De Beers、AEL、Codelco 及 Dyno Nobel 等。

CDEM (Continuum Discontinuum Element Method) 是中国科学院力学研究所李世海研究团队自主研发的连续-非连续数值模拟软件<sup>[25-27]</sup>。该软件将连续介质模型与非连续介质模型进行有机结合,通过朗道点火爆炸模型及 JWL 点火爆炸模型,实现了爆炸载荷的精确施加;通过块体边界及块体内部的断裂<sup>[28-29]</sup>,实现了爆破载荷下岩体破裂破碎过程的精确模拟;通过半弹簧-接触边模型<sup>[30-32]</sup>,实现了破碎块体间碰撞过程及堆积过程的快速计算;通过基于 CUDA 的 GPU 并行<sup>[33-34]</sup>及基于 OpenMP/MPI 的 CPU 并行,实现了爆炸破岩过程的高效模拟。目前,CDEM 软件已成功模拟了不同炸药单耗、孔网参数、起爆顺序下的爆破效果,给出了不同爆破参数下的矿岩块度分布情况及爆破振动情况<sup>[35]</sup>。

## 2.3 机械破磨过程的分析及控制技术

选矿过程中一般涉及到矿岩的初破、中破、细破及碾磨等阶段,为了保证破磨过程的顺利进行,需要对各工序的设备投入量、各工序的衔接过程等进行优化设计,并需要在生产过程中根据块度及岩性对各类设备的工作状态进行动态调整。目前,较为经典的破磨过程分析控制软件是由昆士兰大学可持续资源研究所研发的 JKSimmet<sup>[36]</sup>。

JKSimmet 可以满足选矿厂和冶金工作者的各种需要,设计工程师们可以利用 JKSimmet 对选矿的各个过程进行准确模拟,以便对各类选矿厂的设计进行科学评价。该软件可以对圆锥破碎机、旋回破碎机、颚式破碎机、棒磨机、球磨机、自磨/半自磨、单层筛、DSM 筛、水力旋流器、耙式分级机、螺旋分级机、分矿器、矿浆泵池、矿堆、矿仓等单元模型进行有效的模拟。

MinOOCad<sup>[37]</sup>由 Herbst 及 Pate 等人开发,主要用于破磨流程的设计及生产效率的预测。该软件的特点是根据实时监测数据动态调整各阶段的预测模型,并通过内置的过程控制系统实现在线决策。

## 2.4 矿岩块度监控分析技术

为了精确掌握不同阶段的矿岩块度分布情况,需要采用视频/照相技术及图像处理技术对爆堆表面的块度进行统计分析,并利用视频监控分析技术实时分析出铲装、破磨等不同工序下的矿岩块度。

Split-Desktop<sup>[38]</sup>及 Split-Online<sup>[39]</sup>是由 Split Engineering 公司开发的两套监控分析集成软件系统。Split-Desktop 主要用于爆破后爆堆表面块度的统计分析,软件可对爆堆图像进行自动校正,提取出岩块信息,并最终给出块度分布曲线。Split-Online 则侧重于实时监控,通过在破磨工序的关键点上布设相应的视频监控设备,实时捕获不同关键节点上的块度分布情况,从而提升对整个破磨流程的控制。

## 3 降低采选总成本的关键因素

众所周知,在采矿工程中,爆破是实现矿岩破碎的第一步。澳大利亚每年用于岩石破碎的炸药量高达 100 万 t,美国的炸药用量为 300 万 t,中国每年的炸药用量在 400 万 t 左右,上述炸药用量中的 85% 用于采矿工程。爆破作为矿岩粉碎过程的第一道工序,在岩石破碎及碾磨的能量消耗中起着重要的作用。显而易见,提供给初破机的爆破碎块尺寸越小,则后续机械破磨的耗能就越小;单个碎块内的可见裂缝及微损伤越多,则后续破磨的能量消耗也会减小。

因此, Brent 等<sup>[40-41]</sup>提出了超高强度爆破 (ultra-high intensity blasting, UHIB) 的概念,通过数倍于传统爆破的炸药单耗,达到获得较小块度及较大块内损伤的效果。为了减小高单耗爆破时产生的振动及飞石, Brent 等通过在爆区的特定位置设置一定深度的若干半截孔并先行起爆,造成具有一定厚度的破碎层,而后进行主孔网络的起爆,从而保证主孔爆破产生的能量被松散垫层均匀地吸收。Hawke 等<sup>[42]</sup>提出了高单耗下提升爆破安全性的预条件法,通过将本次爆破的钻孔超深增大至堵塞长度,为下一次的爆破提供预处理的破碎层。

澳大利亚矿业行业研究协会的 Ziernski<sup>[43]</sup>指出,当爆破能量提升 4~5 倍,机械粉碎的能量将减少 25% 以上,整个选矿的成本将节省 20% 以上,粉碎设备的生产效率将提升 25% 以上。

Gaunt 等<sup>[44]</sup>对老挝 Ban Houayxai 金银矿的采选联合优化开展了大量的研究。结果表明,大单耗及高台阶,将有助于减少爆破块度,提升碾磨效率;炸药单耗从 0.8 kg/m<sup>3</sup> 增加至 1.4 kg/m<sup>3</sup> (单耗提升 75%), 硬质原生矿的平均碾磨效率可提高 46%;台阶高度从 5 m 增加至 10 m, 平均碾磨效率可提升 24%。相关实验还表明,炮孔直径越小,可以获得更均匀的爆

破块度。

伊朗 Gol-e-Gohar 铁矿传统爆破开采时的间排距为 5 m×6 m, Kerman 大学的 Hakami 等<sup>[45]</sup>采用 4 m×5 m 的间排距进行了 9 次实验,发现当炸药单耗从 0.11 kg/m<sup>3</sup> 增加到 0.16 kg/m<sup>3</sup> 时 (单耗提升约 45%), 自动及半自动碾磨机的碾磨效率增加了 5% 到 30%, 且能量消耗减小了 4% 到 21%。

Gold Fields 公司<sup>[46]</sup>在秘鲁的 Cerro Corona 铜金矿采用美卓的工艺技术和创新方法 (PTI), 开展了爆破、破碎及碾磨的联合优化研究, 结果表明: 炸药单耗从 0.67 kg/m<sup>3</sup> 增加至 1.6 kg/m<sup>3</sup> (单耗提升约 139%), 特定矿石的破磨效率可提升 19.4%, 所有矿石的平均效率可提升 5.7%。

矿业巨头英美资源集团 (Anglo American) 在巴西戈亚斯 (Goiás) 的磷酸盐矿开展了爆破-碾磨联合优化的研究<sup>[47]</sup>, 利用软件及现场测量探讨了爆破参数对爆破块度的影响规律, 并对矿山进行爆破分区; 对于含有硅酸盐的硬质矿石, 当钻孔间排距从 3.0 m×3.8 m 减小到 2.0 m×2.6 m, 爆破块度分布中的 P80 指标可降低 40% 左右 (从 459 mm 到 278 mm); 对于没有硅酸盐的硬质矿石, 当钻孔间排距从 3.0 m×3.8 m 减小到 2.6 m×3.2 m, P80 减少了 25% (从 270 mm 到 204 mm); 此外, 当钻孔间排距减小时, 用于破碎及碾磨的能耗也将明显降低。

Asgari 等<sup>[48]</sup>在伊朗 Sungun 露天铜矿的 7 个台阶开展了炸药单耗与碾磨能量消耗的对应关系研究。研究表明, 当炸药单耗增加 20%, 爆破成本将会增加 0.04 美元/t, 而碾磨的耗电量将减小 0.096 美元/t。

Lam 等<sup>[49]</sup>对巴布亚新几内亚的 Porgera 露天金矿进行了研究, 炸药单耗从 0.24 kg/t 增加至 0.38 kg/t (单耗增加约 58%), 半自动碾磨机 (SAG) 的产量从 673 t/h 增加至 774 t/h, 产量提高了 15%。

澳大利亚的 Fimiston 金矿, 炸药单耗从 0.58 kg/t 增加至 0.96 kg/t (单耗增加约 66%), 乳化炸药的爆速从 4 550 m/s 增加至 6 000 m/s, 半自动碾磨机 (SAG) 的产量从 1 100 t/h 增加至 1 300 t/h, 产量提升了 18%<sup>[50]</sup>。

美国阿拉斯加的 Red Dog 铅锌矿<sup>[51]</sup>, 通过提高炸药单耗及爆速, SAG 产量提升了 5%~12%。其中, 新方案 2 比当前方案节省了 920 万美元/a (见表 1)。

国内关于 M2M 的工程实践较少, 仅齐大山铁矿于 1992 年进行了“以爆代破”的初步尝试<sup>[52]</sup>, 通过优化爆破设计, 当炸药单耗增加 20%~30%, 电铲装车

表1 Red Dog 矿新旧方案对比<sup>[51]</sup>  
Table 1 Comparison between new and old schemes in Red Dog Mine

类型	炸药	单耗/(kg/t)	SAG产量/(t/h)	产量提升/%
当前方案	铵油炸药(ANFO)	0.29	125	/
新方案1	铵油炸药(ANFO)	0.40	132	5.6
新方案2	乳化炸药	0.45	140	12.0

时间缩短了6.9%,粗破碎的小时处理量提高了3.9%,中破碎的小时处理量提高了3.9%。9个月的实验过程中,采选系统的直接经济效益210万元。

总体而言,增大炸药单耗可在很大程度上提高后续机械破磨的生产效率,并降低生产能耗;当炸药单耗提升1~3倍,破磨生产效率可提升20%以上,能量损耗可减少20%以上。

#### 4 采选联合优化的发展趋势

笔者认为:未来露天金属矿的采选联合优化设计,主要是借助计算机模拟分析技术、现场实时监测技术及无线通讯技术,通过监测数据与计算机模拟的耦合反馈,并结合大数据及人工智能,将采矿过程与选矿过程进行统筹优化,从而达到采选总成本最优的目的。

具体地,即是现场实时获得的各类信息(如打钻信息、爆破信息、铲装信息、运输信息、破碎信息、碾磨信息等)通过无线通讯技术传输至计算中心;计算中心的高性能计算机对海量的监测数据进行快速处理及深度分析,并利用采选联合优化智能分析控制系统(包括数据识别、图像分析、爆破优化设计、爆破效果预测、机械破磨流程控制等多个模块)开展优化模拟,给出各工序的最佳工作指标建议,并预测出各环节的能量消耗及成本消耗;软件将相关控制参数通过无线网络分发给各类采选设备,而采选设备按照新的工作参数开展作业。

#### 5 结语

(1)采选联合优化的理念是将采矿与选矿进行综合考虑,达到总成本最优。开展采选联合优化,关键是根据采场的地层环境、岩石性质、构造发育情况、炸药性能等因素,通过调整、优化爆破参数及装药结构,降低采选的总成本。

(2)计算机模拟分析技术在爆破的优化设计、爆破效果的评价、破磨过程的控制及矿岩块度的实时监控等方面发挥着重要的作用,是采选联合优化中的关键技术。

(3)大量的模拟结果及实践经验表明,增大炸药单耗可在很大程度上提高后续机械破磨的生产效率,

并降低生产能耗;当炸药单耗提升1~3倍,破磨生产效率可提升20%以上,能量损耗可减少20%以上。相关研究还表明:高台阶及高爆速也将有助于矿岩的破碎,并提升后续机械破磨的效率。

(4)基于监测数据及计算机模拟的采选联合动态优化模式将是未来的发展趋势,物联网技术及海量数据的深度分析技术将是实现采选智能调控的关键。

#### 参考文献

- [1] McKee D J. Understanding Mine to Mill[M]. Brisbane: CRC ORE, 2013.
- [2] Scott A, Morrell S M, Clark D. Tracking and quantifying value from mine to mill improvement[C]//Proceedings of Value Tracking Symposium, Proceedings. Melbourne: Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2002: 77-84.
- [3] Adel G, Smith B, Kojovic T, et al. Application of mine to mill optimization to the aggregate industry[EB/OL]. <https://core.ac.uk/display/15018787>[2017-03-21].
- [4] Valery W, Jankovic A, LaRosa D, et al. Process Integration and Optimization from Mine-to-Mill[EB/OL]. <https://zh.scribd.com/document/114382169/Process-Integration-and-Optimization-From-Mine-To-Mill>[2017-03-21].
- [5] 邵安林. 矿产资源开发地下采选一体化系统[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012.  
Shao Anlin. Integration System of Underground Mining and Beneficiation for Underground Mineral Resources Exploration[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012.
- [6] 孙豁然, 毛凤海, 柳小波, 等. 矿产资源地下采选一体化系统研究[J]. 金属矿山, 2010(4): 15-19.  
Sun Huoran, Mao Fenghai, Liu Xiaobo, et al. Research of the integration system of underground mining and beneficiation for underground mineral resources[J]. Metal Mine, 2010(4): 15-19.
- [7] 苑占永, 孙豁然, 李少辉, 等. 地下采选一体化系统采充平衡临界品位研究[J]. 金属矿山, 2011(3): 27-30.  
Yuan Zhanyong, Sun Huoran, Li Shaohui, et al. Research of the critical grade to achieve a balance between mining and filling in integration system of underground mining and beneficiation[J]. Metal Mine, 2011(3): 27-30.
- [8] Orca Mining Services. SHOTPlus™5 Overview[EB/OL]. [http://www.oricaminingservices.com/au/en/page/products\\_and\\_services/blast\\_design\\_software/shotplus5/shotplus5\\_overview](http://www.oricaminingservices.com/au/en/page/products_and_services/blast_design_software/shotplus5/shotplus5_overview)[2017-03-21].
- [9] Soft-Blast. Simulation and Information Management for Blasting in Mines; Overview[EB/OL]. <http://www.soft-blast.com/JKSimBlast/JKSimBlast.htm>[2016-07-21].
- [10] Qu S J, Hao S H, Chen G P, et al. The BLAST-CODE model-A Computer-aided bench blast design and simulation system[J]. Fragblast, 2002, 6(1): 85-103.
- [11] 李向明, 曩世杰, 李光华, 等. 台阶炮孔爆破软件 BLAST-CODE 及其在歪头山铁矿的应用[J]. 金属矿山, 2008(12): 51-54.  
Li Xiangming, Qu Shijie, Li Guanghua, et al. Bench blast design software BLAST-CODE and its application in Waitoushan Iron Mine

- [J]. *Metal Mine*, 2008(12):51-54.
- [12] Battison R, Esen S, Duggan R, et al. Reducing crest loss at Barrick Cowal Gold Mine[C]// *Proceedings of 11th International Symposium on Rock Fragmentation*. Carlton Victoria; The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2015:189-201.
- [13] Goswami T, Martin E, Rothery M, et al. A Holistic approach to managing blast outcomes[C]// *Proceedings of 11th International Symposium on Rock Fragmentation*. Carlton Victoria; The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2015:645-653.
- [14] Nagarajan M, Green A, Brown P, et al. Managing coal loss using blast models and field measurement[C]// *Proceedings of 11th International Symposium on Rock Fragmentation*. Carlton Victoria; The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2015:429-435.
- [15] Minchinton A, Lynch P M. Fragmentation and heave modelling using coupled discrete element gas flow code[J]. *Fragblast*, 1997, 1(1):41-57.
- [16] Esen S, Nagarajan M. Muck pile shaping for draglines and dozers at surface coal mines[C]// *Proceedings of 11th International Symposium on Rock Fragmentation*[M]. Carlton Victoria; The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2015:409-416.
- [17] Preece D S, Tawadrous A, Silling S A, et al. Modelling Full-scale Blast Heave with Three-dimensional Distinct Elements and Parallel Processing[C]// *Proceedings of 11th International Symposium on Rock Fragmentation*[M]. Carlton Victoria; The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2015:127-135.
- [18] Preece D S. Rock Motion Simulation and Prediction of Porosity Distribution for a Two-void-level Retort[R]. Albuquerque; Sandia National Labs., 1990.
- [19] Preece D S, Knudsen S D. Coupled rock motion and gas flow modeling in blasting[R]. Albuquerque; Sandia National Labs., 1991.
- [20] Taylor L E E M, Preece D S. Simulation of blasting induced rock motion using spherical element models[J]. *Engineering Computations*, 1992, 9(2):243-252.
- [21] Onederra I, Ruest M, Chitombo G P. Burden movement experiments using the hybrid stress blasting model (HSBM)[C]// *Explore 2007 Blasting: Techniques and Technology, Proceedings*. Carlton Victoria; The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2007:177-183.
- [22] Sellers E, Furtney J, Onederra I, et al. Improved understanding of explosive-rock interactions using the hybrid stress blasting model[J]. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2012, 112(8):721-728.
- [23] Onederra I A, Furtney J K, Sellers E, et al. Modelling blast induced damage from a fully coupled explosive charge[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2013, 58:73-84.
- [24] Hustrulid H, Iverson S, Furtney J, et al. Developments in the Numerical Modeling of Rock Blasting[EB/OL]. <http://www.infomine.com/library/publications/docs/Furtney-SME2009.pdf> [2017-03-21]
- [25] Wang Y N, Zhao M H, Li Shihai, et al. Stochastic structural model of rock and soil aggregates by continuum-based discrete element method[J]. *Science in China Series E: Engineering & Materials Science*, 2005, 48(S):95-106.
- [26] Li S H, Zhao M H, Wang Y N, et al. A new numerical method for DEM-block and particle model[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(3):436-436.
- [27] 李世海, 刘天苹, 刘晓宇. 论滑坡稳定性分析方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(S2):3309-3324.  
Li Shihai, Liu Tianping, Liu Xiaoyu. Analysis Method for Landslide Stability[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(S2):3309-3324.
- [28] 王 杰, 李世海, 周 东, 等. 模拟岩石破裂过程的块体单元离散弹簧模型[J]. *岩土力学*, 2013, 34(8):2355-2362.  
Wang Jie, Li Shihai, Zhou Dong, et al. A block-discrete-spring model to simulate failure process of rock[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(8):2355-2362.
- [29] 王 杰, 李世海, 张青波. 基于单元破裂的岩石裂纹扩展模拟方法[J]. *力学学报*, 2015, 47(1):105-118.  
Wang Jie, Li Shihai, Zhang Qingbo. Simulation of crack propagation of rock based on splitting elements[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2015, 47(1):105-118.
- [30] 冯 春, 李世海, 刘晓宇. 半弹簧接触模型及其在边坡破坏计算中的应用[J]. *力学学报*, 2011, 43(1):184-192.  
Feng Chun, Li Shihai, Liu Xiaoyu. Semi-spring contact model and its application to failure simulation of slope[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2011, 43(1):184-192.
- [31] Feng C, Li S H, Liu X Y, et al. A semi-spring and semi-edge combined contact model in CDEM and its application to analysis of Jiweishan landslide[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2014, 6(1):26-35.
- [32] Wang J, Li S H, Feng C A shrunken edge algorithm for contact detection between convex polyhedral blocks[J]. *Computers and Geotechnics*, 2015, 63:315-330.
- [33] Ma Z S, Feng C, Liu T P, et al. An optimized algorithm for discrete element system analysis using Cuda[C]// *6th International Conference on Discrete Element Methods (DEM6)*. Golden; Colorado School of Mines, 2013:170-173.
- [34] Ma Z S, Feng C, Liu T P, et al. A GPU accelerated continuous-based discrete element method for elastodynamics analysis[C]// *The Fifth International Conference on Discrete Element Methods (DEM5)*. London; University of London, 2010:228-238.
- [35] 郑炳旭, 冯 春, 宋锦泉, 等. 炸药单耗对赤铁矿爆破块度的影响规律数值模拟研究[J]. *爆破*, 2015, 32(3):62-69.  
Zheng Bingxu, Feng Chun, Song Jinquan, et al. Numerical study on relationship between specific charge and fragmentation distribution of hematite[J]. *Blasting*, 2015, 32(3):62-69.
- [36] JKTech. JKSIMMET V6 RELEASED[EB/OL]. <http://jktech.com.au/jksimmet-v6-released> [2016-07-12].
- [37] Herbst J A, Pate W T. Dynamic Simulation of Size Reduction Operations from Mine-to-Mill[EB/OL]. [http://www.metso.com/miningandconstruction/MaTobox7.nsf/DocsByID/531613164D206AAE42256B510041E659/\\$File/jah\\_mine\\_to\\_mill\\_simulation.pdf](http://www.metso.com/miningandconstruction/MaTobox7.nsf/DocsByID/531613164D206AAE42256B510041E659/$File/jah_mine_to_mill_simulation.pdf) [2016-07-12].
- [38] Split Engineering. Split-Desktop Software[EB/OL]. <http://www.spliteng.com/products/split-desktop-software/> [2017-03-21]

- [39] Split Engineering. Split-Online Systems[EB/OL]. <https://www.spliteng.com/products/split-online-%20systems/>[2017-03-21]
- [40] Brent G F, Rothery M, Dare-Bryan P, et al. Ultra-high intensity blasting for improved ore comminution[C]//Proceedings of Tenth International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting. Boca Raton; CRC Press, 2012:163-169.
- [41] Brent G F, Dare-Bryan P, Hawke S, et al. Ultra-high intensity blasting: a new paradigm in mining[J]. AusIMM Bulletin, 2014(5): 54-56, 58-60.
- [42] Hawke S J, Dominguez A. A simple technique for using high energy in blasting[C]// Proceedings of 11th International Symposium on Rock Fragmentation. Carlton Victoria; The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2015:321-326.
- [43] Ziernski M. Blasting for Comminution[R]. Brisbane; AMIRA, 2011.
- [44] Gaunt J, Symonds D, Menamara G, et al. Optimization of Drill and Blast for Mill Throughput Improvement at Ban Houayxai Mine[C]//Proceedings of 11th International Symposium on Rock Fragmentation. Carlton Victoria; The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2015:343-349.
- [45] Hakami A, Mansouri H, Ebrahimi F M A, et al. Study of the effect of blast pattern design on autogenous and semi-autogenous mill throughput at Gol-e-Gohar Iron Mine[C]//Proceedings of 11th International Symposium on Rock Fragmentation. Carlton Victoria; The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2015:315-319.
- [46] Rosa D L, Caron K, Valery W, et al. Blast fragmentation impacts on downstream processing at goldfields cerro Corona[C]//Proceedings of 11th International Symposium on Rock Fragmentation. Carlton Victoria; The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2015:333-341.
- [47] Silva A C, Martins P A A, Silva E M S, et al. Fragmentation optimization-adopting mine to mill for reducing costs and increasing productivity[C]// Proceedings of 11th International Symposium on Rock Fragmentation. Carlton Victoria; The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2015:363-368.
- [48] Asgari A, Nejad F R, Norouzi S. Blast-induced rock fracturing and minimizing downstream comminution energy consumption[C]// Conference on Explosives and Blasting Technique. Cleveland; International Society of Explosives Engineers, 2015:1-8.
- [49] Lam M, Jankovic A, Valery W, et al. Maximising SAG mill throughput at Porgera Gold Mine by optimising blast fragmentation[C]// SAG 2001. Vancouver; University of British Columbia, 2001:271-288.
- [50] Karageorgos J, Skrypnik J, Valery W, et al. SAG milling at the Fimiston Plant[C]//SAG 2001, Vancouver; University of British Columbia, 2001:109-124.
- [51] Paley N, Kojovic, T. Adjusting blasting to increase SAG mill throughput at the Red Dog Mine[C]//Proceedings of 27th Annual Conference on Explosives and Blasting Techniques. Cleveland; International Society of Explosives Engineers, 2001:65-81.
- [52] 李景环. 论露天矿深孔爆破矿石块度优化的途径[J]. 金属矿山, 1992(10):15-20.
- Li Jinghuan. Discussion on the optimization approach of ore block distribution of deep hole blasting in open pit mine[J]. Metal Mine, 1992(10):15-20.

(责任编辑 徐志宏)