

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.03.014

基于 JKSimBlast 的露天矿爆破效果 数值模拟研究与应用^{*}

黄梦龙^{1a}, 吴钦正², 李金平³, 李桂林², 徐 帅¹, 陈庆凯^{1b}

(1. 东北大学 a. 深部金属矿山安全开采教育部重点实验室; b. 资源与土木工程学院, 沈阳 110819;

2. 山东黄金集团有限公司 深井开采实验室, 烟台 261442;

3. 甘肃酒钢集团 宏兴钢铁股份有限公司, 嘉峪关 735100)

摘 要: 爆破过程研究对于降低矿山成本, 提高矿山效益具有重要作用。针对当前基于现场工业试验开展爆破效果研究周期长、工作量大、成本高, LS-DYNA 等爆破模拟软件要求使用者具有较强的专业知识和力学功底等问题, 论文介绍了爆破分析软件 JKSimBlast 功能组成, 分析了露天爆破模拟模块 2DBench 应用流程, 研究了露天矿爆破模拟分析中的块度分析模型选择、岩体损伤分析参数来源及效果评价两项关键技术及解决办法, 依托某露天矿 3730 m 台阶开展爆破工业应用。根据爆区实际, 采用 5.5 m × 8 m 孔网参数; 采用填塞 7 m、装药 3 m、间隔 3 m、装药 4.8 m 的分段装药结构和填塞 7 m、装药 10.8 m 的连续装药结构; 采用 425 ms 孔内延时时间、17/25/42 ms 地表延时时间进行爆破模拟, 模拟结果表明: 矿山现行爆破参数大块率高, 坡顶面破碎均匀度较差, 且大块趋于爆堆前端, 分析原因是炮孔上部填塞长度过长。软件分析结果与现场块度分析一致, 与现场观测现象吻合, 表明 JKSimBlast 软件模拟结果可靠, 用于露天矿日常爆破设计与分析可行。

关键词: 露天爆破; 数值模拟; JKSimBlast; 爆破损伤; 块度分析

中图分类号: TD854.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2022)03-0095-05

Numerical Simulation of Blasting Effect in Open-pit Mine based on JKSimBlast

HUANG Meng-long^{1a}, WU Qin-zheng², LI Jin-ping³, LI Gui-lin², XU Shuai¹, CHEN Qing-kai^{1b}

(1. a. Key Laboratory of Ministry of Education for Safe Mining of Deep Metal Mines;

b. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. Deep Mining Laboratory of Shan Dong Gold Group Co., Ltd., Yantai 261442, China;

3. Gansu Jiu Steel Group Hongxing Iron & Steel Co., Ltd., Jiayuguan 735100, China)

Abstract: Research on blasting process plays an important role in reducing mine costs and improving mine benefit. However, field industrial tests have the drawbacks of long period, large workload and high cost. Moreover, blasting simulation software such as LS-DYNA requires users to have strong professional knowledge and mechanical skills. This paper introduces the functional composition of blasting analysis software JKSimBlast, and analyzes the application process of 2DBench open-pit blasting simulation module. The study includes the two key techniques and solutions of the selection of the fragmentation analysis model, the source of rock mass damage analysis parameters. Based on the 3730 m bench in an open pit mine, blasting industrial application is carried out. According to the actual situation of blasting area, the burden is determined as 5.5 m and the hole spacing is determined as 8 m. There are two charge structures: One is decked charge with stemming of 7 m, decking of 3 m, charge lengths of 3 m and 4.8 m. The other is continuous charge with stemming of 7 m, charge length of 10.8 m. The initiation network includes in-hole de-

lay of 425 ms and surface delays of 17/25/42 ms. The simulation results show that the current blasting boulder rate of the mine is high, and the fragmentation uniformity of the slope top surface is poor, and the boulder tend to be at the front of the blast pile. The reason may be the long stemming length on the upper part of the blast hole. The software analysis results are consistent with the field fragment analysis results, indicating that the simulation results of JKSimBlast software are reliable and feasible for daily blasting design and analysis in open-pit mines.

Key words: open-pit blasting; numerical simulation; JKSimBlast; blasting damage; fragmentation analysis

钻爆法破岩是当前金属矿山露天开采的主要破岩方式^[1]。矿岩爆破质量优劣将会直接影响后续的铲装、运输以及下游的破碎、磨矿等工艺的生产效率和生产成本^[2]。因此,开展露天矿山爆破过程研究,改善爆破质量,对于降低矿山生产成本、提高矿山效益具有重要意义^[2,3]。

爆破过程分析常用方法是现场工业试验^[4]。如杨超^[5]、尹岳祥^[6]、李顺波^[7]、梁冰等通过现场工业试验研究地质因素、孔网参数、装药结构、延时时间等对爆破块度、粉矿率的影响并进行优化^[8],取得了较好的爆破效果。现场工业试验可以直观地评价爆破效果,验证爆破参数的调整效果,但存在着耗时长、工作量大、成本高等弊端。近年来,数值模拟技术被引入以优化露天矿爆破参数设计及爆破效果分析。如张袁娟^[9]、张艳军^[10]、岳中文^[11]、罗志华等利用 LS-DYNA 对炮孔孔距、填塞长度以及不耦合装药技术进行研究^[12],以优化爆破设计,改善爆破效果。LS-DYNA 软件可以有效避免现场工业试验弊端,并揭示破岩过程中的内在机理变化,但该类软件需要使用者具备较强的数值计算基础及力学分析功底,导致工程实践中应用及推广受到较大限制。

JKSimBlast 软件是一款具备设计、编辑、模拟、分析与管理功能的爆破设计与分析软件。该软件操作简单、界面友好、爆破效果分析工具全面,适合矿山日常爆破设计与分析工作。本文对该软件的构成进行介绍,并分析其中 2DBench 模块的功能、特点以及模拟流程,重点介绍基于 JKSimBlast 开展露天矿爆破过程模拟涉及的两项关键技术,最后依托某铁矿露天开采进行工业应用。本文的研究为露天开采爆破设计与分析提供一种有益途径。

1 JKSimBlast 软件介绍

JKSimBlast 是由昆士兰大学(澳大利亚)JKTech 研发的一款用于爆破设计、分析以及管理的模块化工具^[13]。该软件主要设计分析模块包括:2DBench、2DRing 以及 2DFace,分别适用于露天开采、地下开采和井巷掘进爆破设计。JKSimBlastV3.0 是当前最新版本。除上述设计分析模块外,还有 JKBMS、2DView、TimeHex 等辅助模块分别用于爆破数据管理,爆炸扩展分析,以及延时扩展分析等。

2 2DBench 模块

2.1 2DBench 模块功能及特点

2DBench 用于台阶爆破参数设计优化以及爆破效果分析,可完成从炮孔布置到效果分析的整个爆破模拟流程。其功能包括:允许用户通过逐行、沿线、多边形填充或文本导入等方式创建炮孔,并通过调整孔口或孔底的位置修改炮孔;通过长度、质量、百分比等方式装填炮孔以及长度、高度等方式设置孔内延时;通过设置连接块长度、点燃时间、雷管延时时间、炸药爆速精准控制爆破时间;通过成本、质量等多种指标分析及检查爆破设计;通过最大单段装药量、能量分布等多种工具评价及优化爆破效果。熟练使用该软件,可以有效降低设计人员的劳动强度,提高爆破设计效率,降低矿山生产成本。

2.2 2DBench 爆破模拟流程

2DBench 中,爆破模拟分为三步:爆破设计,基础分析和高级分析。其中,爆破设计主要完成炮孔的布局以及炮孔模拟起爆;基础分析主要是对爆破设计的质量及可行性进行初级判定;高级分析主要是对爆破效果进行分析与评价。爆破设计步骤依次为:定位、钻孔、装药、设置孔内延时、设置地表延时、爆破模拟;基础分析内容包括:成本、质量、炸药单耗、能量因数、起爆等时线;爆破效果分析工具包括:最大单段装药量、能量分布、岩体损伤、块度分析。

3 基于 JKSimBlast 的露天矿爆破模拟关键技术

依据用途不同,2DBench 中的分析工具分为两

收稿日期:2022-06-03

作者简介:黄梦龙(1997-),男,宁夏中卫人,硕士研究生,从事难采矿床开采理论与深部岩体支护技术研究,(E-mail)1766969015@qq.com。

通讯作者:徐 帅(1981-),男,河南南阳人,博士、教授、博导,从事难采矿床开采理论与深部岩体支护技术研究,(E-mail)xushuai@mail.neu.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51874068、52074062);第二批新工科研究与实践项目(E-KYDZCH20201807)“矿业工程通专融合教材体系建设”

大类:一类用于爆破过程中的振动等危害分析,一类用于爆破后的爆破效果评价。其中,岩体损伤工具将爆破振动与岩体形变相互联系,通常用于评估岩体损伤程度^[11];块度分析工具通常用于预测爆破后的块度分布,并可通过计算大块率直观地评价爆破效果。爆破危害控制分析工具主要指最大单段装药量,该工具可用于检查爆轰序列以及判断是否产生过度振动,以达到预测和控制爆破、保护边坡及重要构(建)筑物的目的。爆破效果评价分析工具包括:能量分布、岩体损伤和块度分析。能量分布工具可通过三维静态或四维动态计算,能量密度或质量密度求解并以不同单位显示(kg/t、kg/m³、MJ/t、MJ/m³等),该工具可以评估炸药在平面或体积上的分布,通常用于优化孔网参数以及装药结构^[14]。

3.1 块度分析中的理论模型选择

爆破的首要目的是破碎矿岩^[15]。2DBench 提供了两种模型(Kuz-Ram 模型和 JKMRC 模型)用于预测爆破后的矿石块度分布。Kuz-Ram 模型属于经典模型,应用广泛;而 JKMRC 模型是在 Kuz-Ram 模型基础上简化了所需参数,并进一步优化了对于细颗粒(1~100 mm)的预测精度。两者使用过程中的不同之处在于:①分析对象:Kuz-Ram 模型使用前需要对分析的炮孔进行标记;而 JKMRC 模型则是对分析的范围进行选定。②输入参数:Kuz-Ram 模型实际所需参数多样,包括岩体平均块度、岩石单轴抗压强度等岩体力学参数以及岩体相关节理信息。在 2DBench 中,以上参数被综合指标 BI(可爆性指数)指定,其计算公式为^[16]

$$BI = 0.5(RMD + JPS + JPO + SGI + H) \quad (1)$$

式中: RMD 为岩体质量; JPS 为节理面间距; JPO 为节理面方向; SGI 为重力影响; H 为硬度。

JKMRC 模型所需参数包括:岩体平均块度、细颗粒尺寸、容重、杨氏模量、单轴抗压强度以及抗拉强度。岩体平均块度、细颗粒尺寸、容重数据通过现场获得;而杨氏模量、单轴抗压强度、抗拉强度可在现场取样后通过实验室力学测试获得。

Kuz-Ram 模型参数复杂,且结果易受人为影响;JKMRC 模型参数简单,易于获取,且预测精度更高。因此,建议采用 JKMRC 模型进行计算分析。

3.2 岩体损伤分析中的参数来源及效果评价

2DBench 中采用如下公式计算质点峰值振动速度^[17]

$$PPV = K[M]^\alpha \quad (2)$$

式中: PPV 为质点峰值振动速度,cm/s; K 、 α 定义为衰减常数,与萨道夫斯基公式中一致,需结合现

场爆破振动监测数据基于最小二乘法拟合而得; M 为 Holmberg-Persson 项,与质点位置、炸药类型、炮孔几何特征相关,计算公式如式(3)

$$M = \left(\frac{l}{r_0}\right) \left[\arctan\left(\frac{H + x_s - x_0}{r_0}\right) + \arctan\left(\frac{x_0 - x_s}{r_0}\right) \right] \quad (3)$$

式中: l 为线装药密度,kg/m,计算公式见式(4); H 为装药长度,m; r_0 为质点距药包的水平距离,m; x_0 为质点距地表的垂直距离,m; x_s 为药包上端距地表的垂直长度,m。

$$l = K \frac{W^\alpha}{R^\beta} \quad (4)$$

式中: W 为装药量,kg; R 为质点到爆源的距离,m; β 与 K 、 α 意义相同,此处取值为 2α 。

计算 PPV 目的在于评价爆破效果。用户可通过表 1 中爆破效果、岩体损伤与 PPV 值的对应关系判断爆破后的围岩损伤状态,进而分析爆破效果。其中, PPV_{crit} 为破裂临界值, $PPV_{breakage}$ 为破碎临界值。

表 1 爆破效果、岩体损伤程度与 PPV 临界值对应关系表
Table 1 Correspondence between blasting effect, rock damage degree and PPV critical value

PPV 值/(mm·s ⁻¹)	岩体状态	爆破效果评价
$< PPV_{crit}$	完整	基本不产生影响
$PPV_{crit} \sim PPV_{breakage}$	破裂	破碎不均匀
$> PPV_{breakage}$	破碎	破碎完全且均匀

4 工程案例

4.1 工程概况

4.1.1 矿区地质

某露天开采矿区位于祁连山褶皱系北部,矿区主要金属矿物为镜铁矿和硫铁矿,主要脉石矿物为铁白云石、重晶石、及少量绢云母、绿泥石。矿区内矿石平均容重 3.69 t/m³,平均普氏硬度 14,岩石平均容重为 2.87 t/m³,平均普氏硬度 9.25,矿岩平均松散系数均为 1.6,属易爆矿岩体。现场取样开展实验室实验,得到岩石力学参数结果见表 2。

4.1.2 矿区现有爆破参数

以 3730~3715 m 台阶为例:爆区台阶平均段高为 15.3 m,炮孔超深 2.5 m;采用三角形布孔,孔径 250 mm,基本孔网参数为 5.5 m×8 m;炮孔分 3 排,第 1 排采用分段装药结构,自下而上为装药 4.8 m-间隔 3 m-装药 3 m-填塞 7 m,第 2 排和第 3 排采用连续装药结构,自下而上为装药 10.8 m-填塞 7 m;所用炸药为机制乳化炸药,炸药密度

准,JKSimBlast 计算大块率为

$$K_{\text{大}} = 1 - 71.9\% = 28.1\% \quad (5)$$

Split-Desktop 计算大块率为

$$K_{\text{大}} = 1 - 70.7\% = 29.3\% \quad (6)$$

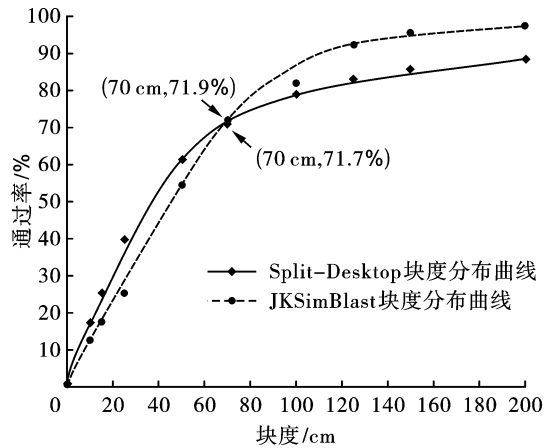


图 3 爆破后岩体块度分布

Fig. 3 Distribution of rock mass fragmentation after blasting

根据矿山要求,认为大块率高于 5% 即为大块率较高,两者所得结论一致。

2) 破碎均匀度

结合 ISensor 设备的现场爆破振动监测数据拟合结果绘制坡顶面(3730 m 水平)、坡底面(3715 m 水平) PPV 等值线图,如图 4 所示。此处, K 值为 366.29, α 值为 2.50, PPV_{crit} 值取 848 mm/s, $PPV_{breakage}$ 值取 3400 mm/s。

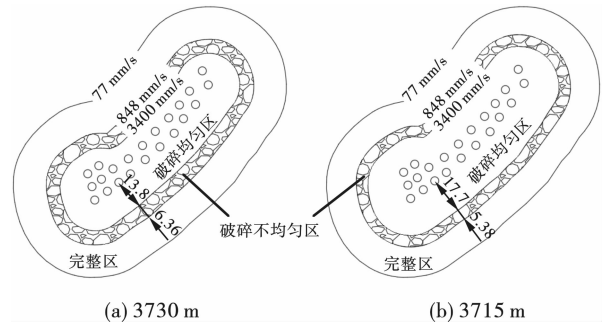


图 4 坡顶面、坡底面 PPV 等值线图(单位:m)

Fig. 4 PPV contour map of slope top and bottom(unit:m)

表 3 参数及取值

Table 3 Parameters and values

参数	岩体平均 块度/m	细颗粒 尺寸/mm	岩石容重/ ($t \cdot m^{-3}$)	杨氏模量/ GPa	单轴抗压 强度/MPa	抗拉强度/ MPa
取值	1.00	10.00	3.69	93.70	143.60	46.57

由图 4 可以看到,坡顶面破碎均匀区域长度为 13.8 m,破碎不均匀区域长度为 6.36 m;坡底面破碎均匀区域长度为 17.7 m,破碎不均匀区域长度为 5.38 m。较坡底面而言,坡顶面破碎均匀区域小,破碎不均匀区域大,破碎均匀性更差,从而造成大块聚于爆堆前端现象。分析其原因是炮孔上部填塞长度过长,导致能量不足引起,建议改善装药结构,以改善坡顶面爆破效果。

5 结论

1)介绍了 JKSimBlast 爆破设计与分析软件构成,分析了其中露天开采模块 2DBench 功能、特点以及基于 2DBench 开展露天矿爆破模拟分析流程。

2)利用 JKSimBlast 开展爆破过程数值模拟,采用 JKMRC 模型作为块度预测模型,利用现场爆破振动监测数据拟合地质影响系数 K 、 α ,采用爆破质点峰值振动速度 PPV 作为爆破损伤评价指标,可以很好的模拟爆破后块度分布模型,揭示爆破损伤区的体积,为爆破效果评估和爆破区域圈定提供支撑。

3)依托某露天矿 3730 ~ 3715 m 台阶爆破实践开展工业应用,研究表明,该次爆破后大块率较高,

达 28.1%;坡顶面破碎均匀区域小,破碎不均匀区域大,破碎均匀度比坡底面差。利用 Split-Desktop 软件块度分析结果对 JKSimBlast 模拟结果进行验证,结论一致,证明了 JKSimBlast 应用于露天矿日常爆破设计与分析可行。

参考文献(References)

[1] 张阳光,林 飞,赵 彭,等.延时时间对露天深孔爆破破碎效果的影响研究[J].工程爆破,2021,27(4): 69-75.

[1] ZHANG Yang-guang, LIN Fei, ZHAO Peng, et al. Research on the influence of delay time on fragmentation in open-pit deep hole blasting [J]. Engineering Blasting, 2021, 27(4): 69-75. (in Chinese)

[2] 李建华,樊保龙,李立波,等.露天深孔台阶爆破质量的模糊综合评价[J].爆破器材,2020,49(3): 59-64.

[2] LI Jian-hua, FAN Bao-long, LI Li-bo, et al. Fuzzy comprehensive evaluation on quality of bench blasting in open pit mine[J]. Explosive Materials, 2020, 49(3): 59-64. (in Chinese)