

基于 CDEM 的露天边坡爆破开采稳定性数值模拟研究

刘殿军¹, 冯春^{2, 3*}, 王永增¹, 朱心广^{2, 3}, 王润¹, 曹洋¹, 孟磊磊¹

(1. 鞍钢集团矿业有限公司齐大山分公司, 辽宁 鞍山 114000; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100190; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 本文利用连续-非连续单元法 (CDEM), 采用应变软化模型和朗道爆源模型, 对爆破作用下露天边坡的动力响应进行了直接模拟。研究了单孔爆破作用下后方岩体的破坏特征, 探讨了爆破距离对边坡稳定性的影响规律。结果表明, 爆破作用下后方岩体主要发生拉伸损伤破坏, 破坏区域形状为一受控于临空面及爆破平台表面的椭球体, 单孔爆破作用下对后方岩体的影响区域为 10m ~ 15m。随着爆破距离的减小, 边坡表面的振动合速度呈线性增大趋势。

关键词: 爆破开采; 露天边坡; 稳定性分析; CDEM; 数值模拟

中图分类号: TD854

文献标识码: A

文章编号: 11-5004 (2020) 01-0294-2

爆破作为一种经济、有效的露天采场岩体开挖手段, 广泛应用于各类露天矿的开采过程中^[1]。爆破开采形成的高陡边坡的稳定性不仅关系到生产效率和工程进度, 更关系到整个矿山的持续发展。一旦露天矿边坡发生失稳、滑移和倾覆坍塌, 将带来不可想象的财产损失和人员伤亡。因此, 爆破开采对露天边坡稳定性的影响一直备受关注^[2-5], 开展爆破作用对露天采场边坡稳定性影响的研究, 对于确保矿山安全生产, 实现矿山的可持续发展均具有重要意义。

目前, 关于爆破荷载作用下边坡动力稳定性的研究还处于探索阶段^[6], 其研究思路也都来自地震对边坡稳定性的影响规律研究, 研究方法主要包括拟静力法、Newmark 法和数值计算方法。数值模拟方法主要有有限元法、离散元法和有限差分法。连续-非连续单元方法 (CDEM)^[7-9]通过有限元与离散元的有机结合, 不仅可以模拟材料的弹塑性变形及接触碰撞过程, 还可以模拟材料从连续到非连续的渐进破坏过程。

总体而言, 国内外的专家学者利用理论公式、经验公式、数值分析等方法对爆破开采及地震波对露天边坡的影响规律进行了深入的研究, 但大部分的研究均以地面测得的振动时程曲线为基础展开。本文利用连续-非连续单元法 (CDEM) 直接模拟三维情况下爆破对边坡的影响, 并重点探讨爆破距离对边坡稳定性的影响规律。

1 计算方法及本构模型

本文的数值模拟主要采用连续-非连续单元方法 (CDEM) 进行。CDEM 方法是一种将有限元与离散元进行耦合计算, 通过块体边界及块体内部的断裂来分析材料渐进破坏过程的数值模拟方法。CDEM 中包含块体及界面两个基本概念, 块体由一个或多个有限元单元组成, 用于表征材料的连续变形特征; 界面由块体边界组成, 通过在块体边界上引入可断裂的一维弹簧实现材料中裂纹扩展过程的模拟。

CDEM 方法的控制方程为质点运动方程, 并采用基于增量方式的显式欧拉前差法进行动力问题的求解, 在每一时步包含有限元的求解及离散元的求解等两个步骤, 整个计算过程中采

用不平衡率表征系统受力的平衡程度。

本文采用考虑应变软化效应的 Mohr-Coulomb 准则及最大拉应力准则描述爆破作用下的边坡岩体剪切损伤破坏及拉伸损伤破坏过程。

本文的爆源模型主要采用朗道点火爆炸模型, 该模型的输入参数包括装药密度, 炸药爆速、爆热及点火点位置。

2 爆破开采对均质边坡的影响研究

2.1 数值模型及参数

以鞍千矿南采区露天台阶边坡为背景, 台阶高度 12m、台阶坡面角 65°、平台宽度 2.6m、边坡帮坡角 55°, 炮孔直径 25cm, 孔深 15m, 填塞 7m。

为了简化计算过程, 研究单一炮孔起爆后对后方边坡的影响, 共探讨 4 个爆破距离, 炮孔到边坡坡脚的距离 D 分别为 20m、15m、10m 及 5m。建立简化的计算模型如图 1 所示, 模型横向宽度 20m, 爆破区域后方共包含 4 个台阶, 炮孔顶部距临空面 3m (底盘抵抗线约 8.6m)。在爆炸平台表面及后方斜坡表面设置 6 个监测点, 监测各位置的振动速度变化规律。其中测点 1 位于爆炸平台的标高且靠近坡脚的一侧, 测点 2 ~ 5 位于不同级台阶边坡的中部, 测点 6 位于顶部平台的中部。以测点 1 的标高为 0 标高, 其余各测点的相对标高分别为 5.6m、16.9m、28.9m、40.9m 及 48m, 如图 1 所示。

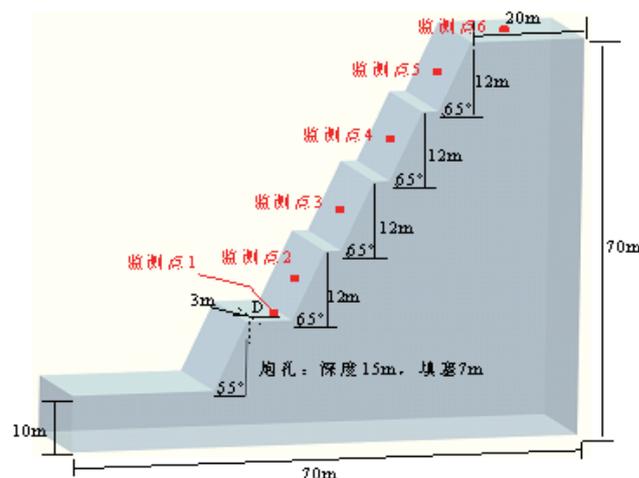


图 1 均质边坡计算模型

收稿日期: 2020-01

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0801603) 资助。

作者简介: 刘殿军, 男, 生于 1973 年, 辽宁大连人, 采矿教授级高级工程师, 研究方向: 露天、井下铁矿及选矿生产、规划、经营管理。

鞍千矿的炸药普遍选用乳化炸药, 装药密度为 $1150\text{kg}/\text{m}^3$, 爆轰速度为 $4250\text{m}/\text{s}$, 爆热为 $3.4\text{MJ}/\text{kg}$, 选用点火爆炸的朗道模型进行描述。铁矿石的材料参数密度 $3200\text{kg}/\text{m}^3$ 、弹性模量 60GPa 、泊松比 0.25 、粘聚力为 36MPa 、抗拉强度为 12MPa 、内摩擦角 40° 、剪胀角 10° 、拉伸及剪切断裂应变为 0.5% , 采用考虑应变软化效应的 Mohr-Coulomb 模型及最大拉应力模型进行描述。

2.2 破坏区域及破坏模式分析

不同爆破距离下岩体进入塑性的情况如图 2 所示, 图中显示了曾经进入过塑性的岩体。由图可得, 随着爆破距离的减小, 塑性区逐渐向后方坡脚靠近; 当爆破距离为 10m 时, 塑性区域已经到达了坡脚附近; 当爆破距离为 5m 时, 塑性区已经波及到后方边坡坡脚的内部。

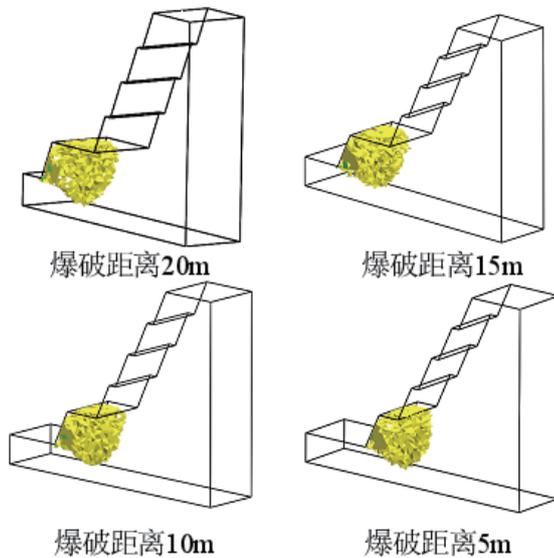


图 2 不同爆破距离下的破坏情况

从图 2 中还可以看出, 炮孔附近的破坏形式以压剪型破坏为主, 而远离爆破的区域以张拉型破坏为主, 爆破引起的后方岩体出现塑性损伤的半径约为 $10\text{m} \sim 15\text{m}$; 整个爆破损伤区域为一在临空面及地表控制下的椭球形。

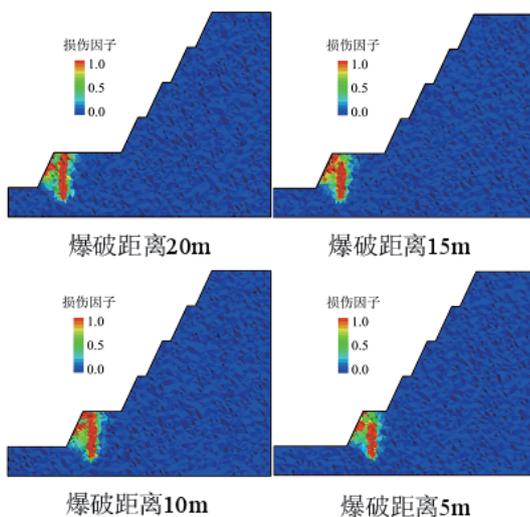


图 3 不同爆破距离下的损伤因子分布图(剖切面)

爆破结束后, 爆破周边岩体的损伤因子剖切图如图 3 所示(剖切位置 $Z=10\text{m}$)。由图可得, 炮孔附近及临空面处的损伤因子最大, 基本接近于 1, 表明这两处区域的岩体已经完全破碎解体。随着爆破距离的逐渐减小, 损伤区域逐渐向坡脚靠近; 当爆破距离为 5m 时, 损伤区域已经扩展至上部台阶边坡的底部。

振动合速度幅值随着爆破距离的变化规律如图 4 所示。由图 4 可得, 随着爆破距离的增大, 同一测点处的合速度幅值基本呈线性逐渐减小。

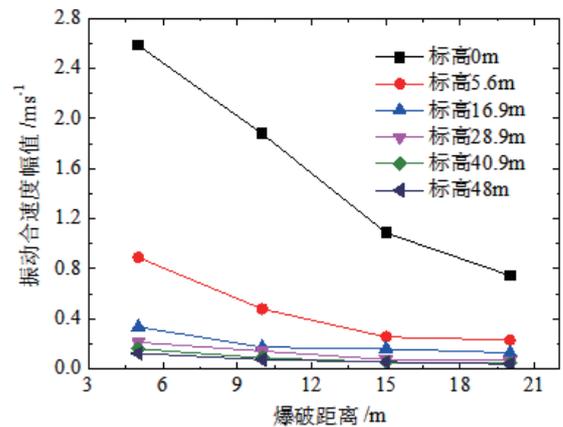


图 4 合速度幅值随爆破距离的变化曲线

3 结论

本文利用连续-非连续单元法 (CDEM), 采用应变软化模型和朗道爆源模型, 对爆破作用下三维露天矿台阶边坡的动力响应进行了直接模拟, 研究了单孔爆破作用下后方岩体的破坏特征, 探讨了爆破距离、节理产状、节理强度等因素对边坡稳定性的影响规律, 所得结论如下:

爆破作用下, 后方岩体主要发生拉伸损伤破坏, 破坏区域形状为一受控于临空面及爆破平台表面的椭球形; 单孔爆破作用下, 对后方岩体的影响区域为 $10\text{m} \sim 15\text{m}$ 。随着爆破距离的减小, 边坡表面的振动合速度幅值基本呈线性增大趋势。

参考文献

- [1] 罗周全, 贾楠, 谢承煜, 等. 爆破荷载作用下采场边坡动力稳定性分析[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2013(9):3823-3828.
- [2] 杨溢, 王国华, 张智宇. 生产爆破振动对边坡破坏的累积效应研究[C] // 第九届全国工程爆破学术会议论文集, 2008.
- [3] 郭学彬. 爆破振动作用的坡面效应[J]. 岩石力学与工程学报, 2001(1):83-87.
- [4] 李祥龙. 爆破震动对边坡稳定性影响分析[J]. 爆破, 2006, 23(4):15-20.
- [5] 金文法. 大型露天矿临近固定边坡爆破设计[J]. 铜业工程, 2010(2):19-22.
- [6] 夏祥, 李俊如, 李海波, 等. 爆破荷载作用下岩体振动特征的数值模拟[J]. 岩土力学, 2005, 26(1):50-56.
- [7] LI S H, WANG J G, LIU B S, et al. Analysis of critical excavation depth for a jointed rock slope using a face-to-face discrete element method[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2007, 40(4):331-348.
- [8] FENG C, LI SH, LIU XY, 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.
- [9] 李世海, 刘天革, 刘晓宇. 论滑坡稳定性分析方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28:3309-3324.