

岩石钻孔分析飞石运动轨迹现状综述

薛冰, 鲁海峰

安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2023年5月29日; 录用日期: 2023年6月28日; 发布日期: 2023年7月5日

摘要

岩石钻孔进行爆破是一种常用的工程技术, 可以有效地将大型岩石块炸成小块, 便于搬运和加工。在工程爆破作业中从爆破处抛掷到空中或者沿地面抛掷的岩石、泥土、杂质等, 脱离主爆破堆的物质就是爆破飞石, 飞石是岩石爆炸后产生的一种危险物质, 需要进行运动轨迹分析来评估其对周围环境的潜在影响。本文主要介绍了利用理论分析、模型实验和数值模拟等几种方法分析飞石的运动轨迹的研究现状和发展。

关键词

岩石钻孔, 理论分析, 模型试验, 数值模拟, 爆破飞石运动轨迹

A Review of Rock Drilling Analysis of Flying Rock Trajectory

Bing Xue, Haifeng Lu

School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

Received: May 29th, 2023; accepted: Jun. 28th, 2023; published: Jul. 5th, 2023

Abstract

Rock drilling blasting is a common engineering technology, can effectively blast large rocks into small pieces, easy to transport and processing. In engineering blasting operations, rocks, soil, impurities, etc., which are thrown into the air from the blasting site or along the ground, are substances that are removed from the main blasting pile. Flying rocks are a kind of dangerous substances produced after rock explosion, and it is necessary to conduct movement trajectory analysis to assess its potential impact on the surrounding environment. This paper mainly introduces the research status and development trend of analyzing the trajectory of flying rocks by using several methods such as theoretical analysis, model experiment and numerical simulation, and

the prospect for the future.

Keywords

Rock Drilling, Theoretical Analysis, Model Test, Numerical Simulation, Trajectory of Blasting Flying Stone

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

岩石钻孔爆破技术适用于建筑工程中的大块岩石和开采大型矿石。爆破过程需要钻孔机械将钻孔钻入岩石内部,然后将炸药装入钻孔中,并引爆炸药,使岩石炸裂成小块。爆破飞石运动是指在爆破过程中,炸药炸裂时产生的碎片或石块以高速飞出,并在空中运动的物理现象。飞石的轨迹形状也受到飞石的质量、形状、旋转等因素的影响。该运动具有复杂的运动轨迹和高速度特征,在矿山、隧道等工程中经常出现,对人员和设备造成严重的威胁,对于工程爆破的安全和效率有着重要的影响。因此,对爆破飞石运动轨迹的研究一直是爆破工程中的重要研究方向之一。

岩石钻孔分析飞石运动轨迹旨在研究岩石钻孔爆破过程中产生的飞石运动轨迹模拟与分析,以评估其对周围环境和人员的安全影响,并为岩石钻孔爆破过程中的安全措施提供参考。针对岩石钻孔爆破过程中产生的飞石运动轨迹,国内外的研究者使用了多种模拟方法和分析工具,包括数值模拟、物理模拟和实验室测试等。这些方法可以帮助研究者更好地了解飞石的运动轨迹和速度,以及其对周围环境和人员的影响,和各种安全措施。

总的来说,国内外的研究者对岩石钻孔分析飞石运动轨迹的研究是非常重要的,它不仅可以提高钻孔爆破过程的安全性和可持续性,也可以为相关领域的发展提供有益的参考和支持。

2. 爆破飞石的产生机理

在大多数情况下,爆理的对象是具有非均质性和各向异性特征的岩体,往往隐含薄弱层、裂缝、节理、断层等结构面,爆炸处理前难以完全控制岩体的各个部分。这些结构表面与岩石相比较弱,分解时需要的爆炸能量较少,并且炸药在炮孔中的位置很难解释每个薄弱表面的存在。因此,炸药在岩体中爆炸后,爆轰气体会首先从这些薄弱点逸出,携带单个碎片形成飞石。也就是说,飞石的爆炸是由于爆破过程中能量分布不均匀而发生的,石块从薄弱区或阻力线的方向喷射出来,从炸药堆中消散在偏远的地方,特别是当最小阻力线较小时,爆炸产生的气体的高温高压沿着爆炸岩体的脆弱表面高速喷射,携带破碎岩体的碎片,迅速爆发形成飞石[1]。

总的来说,通过现场爆破过程中飞石的观察,并结合理论判断,分析飞石的产生存在以下原因:① 岩石结构不均匀,在节理、软弱夹层、断层等薄弱面时,爆轰气体通过薄弱岩层面冲出,致使过远的飞石前冲。② 爆破区前排孔的下部被挖空,形成“伞式檐口”,结果局部阻力线太小,爆震气体在破碎岩体的过程中首先沿最小阻力线方向集体爆发,并携带破碎的石块,然后形成飞石[2]。③ 炮孔堵塞的缺陷,堵塞段长度不够,施工过程因冻孔、水孔造成堵塞质量不佳,加上爆区周围和孔口顶部破碎的岩石,爆轰气体携带较多碎石冲出炮孔,形成冲炮产生飞石。④ 两个爆炸区之间的通信距离较大,导致前孔阻力线

较大, 爆炸的能量无法将岩体完全推出正面, 而是首先以弱阻力立即渗出孔外, 形成飞石。

3. 爆破飞石运动轨迹研究方法

飞石爆炸是最具威胁性的爆炸物对人员和设备的有害影响, 许多受害者都是由于对飞石爆炸控制不当造成的, 长期以来飞石爆炸问题在国内外的研究领域和建筑业引起了极大的关注。事实上, 爆炸飞石是由爆炸过程中爆炸时产生的巨大能量与母体分离的小块岩石碎片形成的, 由于飞石离开母体时投掷位置、投掷能量、投掷方向和角度的不确定性, 很难准确计算出其中一块飞石[3]。飞石的投掷范围过大, 主要是由于爆破时自身最小阻力线距离小或炸药装药过多造成的。它的飞行方向通常沿阻力最小的线方向, 受爆炸性飞石影响的区域较小, 但在其影响范围内, 对人员和设备的威胁非常大。综合前辈们所做的研究, 爆破飞石运动轨迹的研究方法主要包括理论分析、模型试验和数值模拟这3种方法。

3.1. 理论分析

理论分析方法通过对爆破飞石的基本物理原理和规律进行研究, 推导出数学公式, 对爆破飞石的运动轨迹、速度、落点等参数进行预测。适用于爆破物质、爆破条件和爆破环境等的参数比较简单且较小的爆破区域和低速度的飞石。

理论分析方法主要依靠数学模型和物理原理, 有的学者研究爆破飞石运动轨迹采用理论分析法推导出公式, 部分学者研究如下述:

1) 从预测飞石爆炸的角度来看, 飞散物体爆炸的投掷距离公式尚未得到学术界的认可, 现有的几个经验公式得到的预测结果相差很大。为了解决上述问题, 李修贤[4]学者在量纲分析的基础上, 从理论推断的角度, 建立了投掷颠覆性飞行物体距离的公式, 并用数理统计方法对测量数据进行了核对。结果表明, 采用量纲分析法推导的爆炸性飞行物投掷距离预测公式比其他一些经验公式/传统预测公式具有更好的拟合精度, 相对误差降低了近20%。也有学者根据量纲法对爆破飞石进行了研究。吴春平、刘连生[5]等人也采用了量纲法对爆破飞石的产生过过程进行分析。通过量纲分析, 可以正确地分析各变量之间的关系和简化实验结果[6]。量纲分析法只需要将物理现象的影响因素列出, 然后进行无量纲分析, 可以很好地简化爆破问题的分析过程, 是爆破理论分析的一种重要方法。

2) 王文杰[7]通过对爆炸性飞石的理论分析和计算, 得到了采石场底部爆炸时飞石的运动轨迹和飞石的飞行范围。首先, 分析了爆炸性岩石的运动规律, 爆炸性飞行物的运动主要包括运动轨迹、飞行速度、飞散方向, 这是确定爆破作业防护预警范围和获取露天矿井采石场底部爆破作业中爆炸飞石弹道和飞行距离的依据。因此, 飞石爆炸的轨迹可以简化为抛物线运动的一般形式。由于各种原因, 爆炸飞行物的散射方向不同。飞散的主要方向可以是沿着炮孔朝向孔的轴线, 沿着最小抵抗线的方向和其弱表面的方向[8]。然后从理论上计算出石头的飞行距离, 根据试验可以看出, 石头从松散爆破的飞行距离可以控制在短距离内。根据采石场底部的爆炸情况, 采用通常的运行轨迹方法计算石头的飞行距离, 以检查飞石防护距离的安全性。

3) 周显慈[8]研究了飞石产生的原因, 进行爆破飞石的运动分析, 推导出了飞石运动规律的计算公式, 对飞石进行了弹道分析, 推出了飞石最大飞行距离的计算公式。

4) 运动轨迹分析通常使用爆炸动力学和数值软件来模拟飞石的运动轨迹。其中, 爆炸动力学是一种研究爆炸过程中物质受力和变形、热效应等物理现象的学科, 其模拟结果可用于预测飞石的速度和方向。在分析飞石运动轨迹时, 需要研究爆炸能量的释放过程、飞石的初速度和初位置等因素, 这些都可以通过爆炸动力学的理论来解释。大连理工大学力学研究所学者李守巨[9]以爆炸动力学理论为基础, 首次对飞石的投掷范围进行了理论分析, 并利用物理基本定律创建了方程组来解决问题。设爆炸介质为不可压

缩液体, 由质量守恒定律得到介质的微分运动方程, 经理论分析得出液袋中为浓缩装药, 当爆炸介质的特性和爆炸特性确定后, 飞石的最远投掷距离与液体包装半径和炸药单位流量成正比, 与最小抵抗成反比[9]。

3.2. 模型试验

模型试验方法是通过建立缩小比例的模型, 模拟实际的爆破过程, 观察飞石运动轨迹和落点等参数, 并通过测量数据来对爆破飞石的运动特性进行研究。适用于较小的爆破区域和低速度的飞石。模型试验的准确性和可信度受到模型缩放比例、爆破条件和实验过程中的误差等因素的影响。部分学者采用模型实验来进行探究, 如:

1) 有的学者使用 BP 神经网络的模型实验来研究飞石的爆炸距离。刘庆, 张光权等[10]首先将 BP 神经网络模型引入飞石爆炸预测研究, 以最大单孔数、单次炸药消耗量和最小抵抗线作为影响爆炸石最大距离的主要因素, 建立了 BP 神经网络模型预测飞石爆炸, 然后以某露天矿山深孔台阶松动爆破为例, 利用爆炸施工过程中收集的爆炸性飞石监测数据和原始数据, 训练了 BP 神经网络的建立模型, 最后利用 BP 神经网络的训练模型预测了到飞石的距离。与实测值对比后发现, BP 网络模型的预测结果与实测值非常接近, 可能满足工程实践要求, 是预测飞石最大爆炸距离的有效方法。

2) 陈建宏[11]等人通过创建耦合预测模型, 结合灰色相关分析和 Elman 神经网络, 分析了采石场爆破飞石最大散射距离问题。首先, 采用灰色相关分析方法对数据进行预处理, 以确定影响因素与飞石爆炸距离的相关性; 然后, 根据相关程度的大小, 选择具有高度相关性的影响因素作为 Elman 神经网络输入层的数据; 最后, 神经网络函数用于训练和预测数据。结果表明, 采用灰色相关分析方法确定主要影响因素, 由于输入层高于单个 Elman 神经网络, 达到 95% 以上。

3.3. 数值模拟分析

数值模拟方法是通过建立数学模型, 采用数值计算的方法, 对爆破飞石的运动轨迹、速度、落点等参数进行模拟和预测。它可以考虑更多的参数和影响因素, 适用于复杂的爆破区域和高速度的飞石。数值模拟方法主要受到数学模型的准确性和合理性的影响因素的影响, 模型参数的准确性和模拟过程中的误差等都会对模拟结果产生影响。

数值软件可以模拟爆炸事件的物理机械过程, 模拟飞石的轨迹, 求解运动方程。借助模拟计算, 可以获得飞行高度、飞行范围和飞石速度等信息, 以评估它们对环境的威胁。部分学者采用数值软件分析研究爆破飞石运动轨迹, 部分学者研究方法如下述:

1) 从数值模拟分析的角度出发, 李修贤[4]利用 ANSYS/LS-DYNA 仿真软件创建了各种高空条件下岩体爆破 SPH-FEM 耦合模型, 并通过观察 SPH 粒子在不同时间节点的分布图, 概括了爆破作业中挥发物的形成过程和运动特征。结果表明: 沿最小阻力线方向的粒子飞散最远, 偏离最小阻力线方向的飞石飞行距离随偏转角增大而减小。

2) 张金泉、魏海霞[12]以露天阶梯式爆炸处理为例, 利用外弹理论定义的六种理想条件下投掷爆炸物飞石的外部弹道曲线, 在此基础上利用 MATLAB 图形用户界面和强大的图像处理功能, 创建了一套小型爆炸飞石预测智能系统[13], 动画等功能, 用于完成飞石散射距离的预测和飞石运行轨迹的动画演示。

3) 一些科学家利用现场实验研究了飞石爆炸过程中的最大飞散距离。例如, 贾达、陈星明[14]等预测并研究了中小型露天矿中飞石最远飞行距离, 总结了四川省中小型露天石灰岩矿背景下的相关影响因素, 对中小型露天矿中飞石最长飞行距离进行了深入研究, 得到了预测飞石最长飞行距离的科学合理公式。对该县石灰石矿飞石爆炸的现场研究发现, 影响中小型露天矿飞石范围的因素主要包括最小抵抗线、

岩石性质和坡高, 以及爆炸装置的消耗, 其中炸药消耗量和最小抵抗线决定了飞石的初始速度, 坡度的高度决定了飞石的运动状态, 四个因素共同决定了爆破飞石的飞散范围。

笔者将线性回归分析引入飞石最远散射距离研究, 以边坡高度、最小抵抗线和矿炸药单位消耗量为主要因素, 建立正交试验, 利用飞石建模软件模拟各种条件下飞石最远散射距离, 了解飞石射程并得到结果模拟分析。基于正交试验理论, 通过仿真试验得到的爆炸飞石最远飞行距离的方差分析[15], 可以确定受控因素对试验结果的影响。通过执行范围分析, 可以更简要地了解测试因素对测试结果的影响趋势。最后, 通过 SPASS 线性回归分析得到爆炸性飞石最远飞行距离预测公式, 提高了预测精度, 为确定未来中小型露天矿的合理安全预警范围提供了指导。

总的来说, 三种方法各有优缺点, 应根据实际情况选择适合的方法。在实际应用中, 可以综合采用多种方法, 互相验证、补充和完善, 以提高研究结果的准确性和可信度。

4. 爆破飞石的研究意义及发展

在爆炸危险性中, 飞石的爆炸振动和爆破飞石更为复杂[16]。飞石爆炸的危险性主要体现在受害者、建筑物、机械设备的损坏等方面, 而受害者是飞石爆炸的最大危险。统计数据显示, 在我国, 由于飞石爆炸造成的人员伤亡, 建筑物损坏事故占有所有爆炸事故的 15%~20%, 而我国露天矿井的飞石爆炸事故占有所有爆炸事故的 27% [17]。因此, 了解飞石爆炸的危险性, 研究飞石爆炸的原因, 对防止爆破事故的发生具有重要的意义[18]。

与前人工作相比, 现代科技的发展使得研究方法更加多样化和精细化。以数值模拟为例, 传统方法主要依靠有限元、有限差分等方法, 而现代方法则采用更加高级的计算方法。此外, 现代模型试验技术也在不断创新, 可以模拟更加复杂的爆破过程和飞石运动轨迹。研究者们利用现代科技手段, 对于爆破飞石运动轨迹进行了大量的实验和数值模拟, 并与实际情况进行对比和验证, 使得我们对于爆破飞石运动轨迹的认识更加深入和全面。未来, 爆破飞石运动轨迹研究将继续发展, 以更好地满足工程爆破领域的实际需求。

参考文献

- [1] 兰振. 深孔爆破飞石产生的机理计算及控制措施[J]. 世界有色金属, 2018(13): 182, 184.
<https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-5065.2018.13.100>
- [2] 莫明凯. 石灰石检测及氧化钙含量测定研究[J]. 云南化工, 2020, 47(10): 88-90.
<https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-275X.2020.10.32>
- [3] 张天宇. 近邻建(构)筑物路堑爆破开挖安全快速施工技术研究[D]: [硕士学位论文]. 绍兴: 石家庄铁道大学, 2018.
- [4] 李修贤. 临近民房岩体爆破振动和飞石预测及控制措施研究[D]: [硕士学位论文]. 南宁: 广西大学, 2022.
<https://doi.org/10.27034/d.cnki.ggxu.2022.001112>
- [5] 吴春平, 刘连生, 窦金龙, 等. 爆破飞石预测公式的量纲分析法[J]. 工程爆破, 2012, 18(2): 26-28.
- [6] 谈庆明. 量纲分析[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2005.
- [7] 王文杰. 露天坑底爆破飞石的运动轨迹理论分析及堵塞防护试验[J]. 有色金属(矿山部分), 2013, 65(5): 88-91.
- [8] 周显慈. 建筑物拆除爆破中飞石的控制机理研究[J]. 淮南职业技术学院学报, 2002, 2(3): 37-38, 41.
- [9] 李守巨. 拆除爆破中飞石抛掷距离的研究[J]. 爆破, 1994(4): 10-12.
- [10] 刘庆, 张光权, 吴春平, 等. 基于BP神经网络模型的爆破飞石最大飞散距离预测研究[J]. 爆破, 2013, 30(1): 114-118.
- [11] 陈建宏, 彭耀, 鄢书良. 基于灰色 Elman 神经网络的爆破飞石距离预测研究[J]. 爆破, 2015(1): 151-156.
- [12] 张金泉, 魏海霞. 爆破飞石飞散距离的智能预测和运行轨迹的动画演示[C]//中国煤炭学会煤炭爆破专业委员会. 现代爆破理论与技术——第十届全国煤炭爆破学术会议论文集. 北京: 煤炭工业出版社, 2008: 37-38, 41.

- [13] 魏海霞. 台阶爆破灾害预测智能专家系统的开发与应用[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 山东科技大学, 2007.
- [14] 贾达, 陈星明, 莫超, 等. 中小型露天矿山爆破飞石最远飞散距离预测研究[J]. 工业安全与环保, 2021, 47(3): 30-33.
- [15] 黄焰. 事故损失统计中的量化问题[J]. 工业安全与防尘, 1999(9): 35-37.
- [16] 康宁. 工程爆破中的飞石预防和控制[J]. 爆破, 1999(1): 84-91.
- [17] 马运锋, 裴茂才. 复杂环境条件下爆破飞石防护技术[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2017(31): 107-108.
<https://doi.org/10.19569/j.cnki.cn119313/tu.201731097>
- [18] 任翔, 韦爱勇. 爆破飞石的控制与防护[J]. 采矿技术, 2005, 5(1): 80-81, 113.
<https://doi.org/10.13828/j.cnki.ckjs.2005.01.033>