# 基于 Weibull 分布的巷道围岩开挖损伤分析

张晓君<sup>1,2</sup>,郑怀昌<sup>1</sup>

(1.山东理工大学资源与环境工程学院,山东淄博市 255049;2.中国矿业大学 建筑工程学院,江苏徐州市 221008)

摘 要:首先,在假定微元强度服从双参数 Weibull 分布的基础上,分析了围岩微元破坏概率和临界破坏概率,依据围岩 完整程度不同,分析了巷道开挖后的围岩损伤;随后,运用岩 石破裂过程分析软件 RFPA,分别对不同均质度的巷道围岩 开挖损伤进行了数值模拟分析。结果表明,伴随围岩均质度 增加即围岩完整程度增加,围岩起始损伤延后,临界破坏概 率越来越小;在围岩微元所受载荷达到其统计平均抗压强度 前,围岩的均质度越低其巷道开挖后的围岩损伤值越大;在 微元所受载荷达到统计平均抗压强度后,围岩均质度越高其 巷道开挖后的围岩损伤值越大,其巷道开挖后的围岩损伤破坏程度与 围岩完整程度和抗压强度关系密切;分析结果与模拟结果是 一致的。

关键词: 图岩损伤; weibull 分布; 声发射; 数值模拟 中图分类号: TD265 文献标识码: A 文章编号: 1005 - 2763 (2010) 02 - 0040 - 05

## Analysis on Surrounding Rock Damage of Roadway Based on Weibull Distribution

Zhang Xiaojun<sup>1,2</sup>, Zheng Huaichang<sup>1</sup>

 School of Resources and Environment Engineering, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255049, China;

 School of Architecture and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China)

Abstract: Based on the assume that the strength of micro – element of surrounding rock accords with double – parameter Weibull distribution, the failure probability and critical failure probability of micro – element of surrounding rock were analyzed. According to different integrity of surrounding rock its damage after roadway excavation was analyzed. The numerical simulation of excavation damage of roadway surrounding rock with different homogeneity was carried out by using a rock failure process analysis code (RFPA). The results indicated that with the increasing of the homogeneity (i. e. integrity) of surrounding rock the initial damage postponed, the critical failure probability was becoming lower. When the load of micro – element did not reach the statistical average compressive strength, lower the homogeneity was, larger the damage was. After the load of micro – element reached the statistical average compressive strength, higher the homogeneity was, larger the damage was, so surrounding rock with high homogeneity has high hazard rate, and the hazard often burst up. After excavation the damaging degree of roadway surrounding rock is closely related to its heterogeneity and compressive strength. The results of damage analysis of surrounding rock based on Weibull distribution agree with that of simulation analysis.

Key Words: Surrounding rock damage, Weibull distribution, Acoustic emission, Numerical simulation

巷道开挖后的围岩损伤程度是影响巷道稳定性 的重要因素,因此,很多学者进行了大量工作。在岩 石变形破坏损伤概率本构模型方面,将连续损伤理 论和概率理论有机地结合起来,从岩石微元强度服 从某种随机分布的角度出发,进行岩石变形破坏损 伤概率本构模型的研究<sup>[1-3]</sup>。文献[4]基于损伤理 论得到了不同地应力情况下的圆形巷道围岩应力 场。针对深部围岩体卸荷的特点,引入拉伸应变来 描述损伤,得到了岩石损伤弹塑性耦合本构模型,并 将其编译为计算软件 FLAC 的用户自定义本构模 型,在此基础上,对深部围岩开挖损伤区进行了数值 模拟<sup>[5]</sup>。以岩体微观缺陷的分布和 Weibull 理论为 基础,定义了一个损伤变量,推导了损伤演化方程, 对岩巷爆破围岩损伤演化进行了分析及建立损伤判 据<sup>[6]</sup>。文献[7]在内变量不可逆热力学的理论框架 下,应用能量耗散的基本原理,求解弹性损伤的等效 应变和损伤演化方程,建立损伤屈服准则,应用考虑

基金项目:山东省自然科学基金资助(Y2008F51).

作者简介:张晓君(1975 -),男,辽宁北票人,副教授,博士研究生,从事岩土工程与采矿工程教学和研究工作, Email: zhangxj@ sdut. edu. cn。

收稿日期:2009-04-23

能量耗散的本构方程,求解大型地下洞室围岩稳定 问题,分析结果能够给出洞室围岩损伤演化区的范 围和损伤值的大小,进而判断洞室围岩何处发生损 伤和断裂。本文在假定微元强度服从双参数 Weibull 分布的基础上,分析了不同均质度情况下的 围岩微元破坏概率和临界破坏概率,随后,运用岩石 破裂过程分析软件 RFPA,分别对不同均质度下的 巷道围岩损伤进行了数值模拟,得出了有价值的 结论。

1 围岩损伤分析

由于岩石材料形成环境的复杂性和长期的地质 作用,岩石材料内部存在大量的缺陷和损伤,因此可 以把岩石划分成大量的网络单元,在模型中引入统 计学理论假定这些细观单元强度符合某种统计分 布<sup>[8]</sup>。假定岩石微元强度服从 Weibull 分布,则其 概率密度函数和分布函数可表示为:

$$f(\sigma) = \frac{m}{\sigma_0} (\sigma/\sigma_0)^{m-1} \exp(-(\sigma/\sigma_0)^m) \quad (1)$$

$$F(\sigma) = 1 - \exp(-(\sigma/\sigma_0)^m) \qquad (2)$$

式中, σ 为微元强度; σ<sub>0</sub> 为岩石材料的统计平均抗 压强度; m 为材料的均质度,且有 m > 1,其值越大, 材料越均匀,微元之间的差别越小。将其推广到围 岩系统,对于围岩来说,均质度反映的是围岩系统的 完整性,均质度越小,围岩越破碎,反之则越完整。

岩石材料的损伤是由这些微元体的不断破坏引 起的,以岩石微元破坏概率作为其损伤变量 D,可以 表示为:

$$D = n/N = F(\sigma) = 1 - \exp(-(\sigma/\sigma_0)^m)$$
(3)

式中, n 是破坏单(微)元个数, N 为岩石材料单 (微)元总数。

可靠度函数也称生存函数,是指微元所受载荷 达到 σ 时尚未破坏(尚完好)的概率:

 $R(\sigma) = 1 - F(\sigma) = \exp(-(\sigma/\sigma_0)^m) \quad (4)$ 

危险率函数也称失效率函数,是指在微元所受 载荷达到  $\sigma$  时尚未破坏的微元在  $\sigma$  以后的一个单 位强度内破坏的概率  $\lambda(\sigma)$ 。更严格地说, $\lambda(\sigma)$ 是 在已知随机变量  $\sigma \ge \sigma_0$ 的条件下,随机变量  $\sigma$  的条 件密度。它与前述各量之间的关系为:

$$\lambda(\sigma) = f(\sigma)/R(\sigma) = \frac{m}{\sigma_0} (\sigma/\sigma_0)^{m-1} \quad (5)$$

考虑均质度的影响,统计平均抗压强度取 60

MPa,损伤变量随微元所受载荷的变化规律见图1, 从图1可以看出,微元所受载荷达到统计抗压强度 前的曲线单调增大,是凹曲线,微元所受载荷达到统 计抗压强度后单调增大,是凸曲线,凹凸程度依均质 程度而不同,在微元所受载荷达到材料的统计平均 抗压强度前,均质度越低损伤值越大,对于高完整的 围岩很少产生损伤,而较破碎的围岩则损伤破坏严 重,这与实际情况一致。在微元所受载荷达到材料 的统计平均抗压强度时具有相同的损伤值,在达到 统计平均抗压强度后,均质度越高损伤值越大,最终 都趋于1。伴随均质度增加,起始损伤延后。危险 率随微元所受载荷的变化见图 2,从图 2 也能很好 的说明均质度的影响,在微元强度增加后期,均质度 高的具有高的危险率,同时也说明在高应力环境下, 完整围岩具有高的危险率,比如岩爆常发生在完整 的围岩中,分析与实际情况是一致的。



微元所受载荷的变化源于环境的变化,巷道开 挖后,应力重新分布,围岩微元所受载荷发生变化, 在应力集中区,微元所受载荷增加明显,对于高均质 脆性围岩,微元所受载荷接近或达到岩石的统计平 均抗压强度时,危险率大幅度增加,任一损伤或任一 单位载荷的增加都有可能诱致围岩突然破坏(应力 集中区的微元集中破坏),应力集中区的微元集中 破坏后并卸载,应力集中向深部转移。

根据损伤力学理论的思想,用有效应力表示的

岩体损伤破坏准则为:

$$f(\sigma^*) = \sigma_1^* - \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi} \sigma_3^* - \frac{2c\cos\varphi}{1 - \sin\varphi} = 0$$
(6)

式中,  $c_{\varphi}$ 分别为岩石粘聚力和内摩擦角,  $\sigma_1^* \cdot \sigma_3^*$ 分别为名义应力  $\sigma_1 \cdot \sigma_3$ 对应的有效应力, 且有,

$$\sigma_1^* = \sigma_1 / (1 - D_1)$$
 (7)

$$\sigma_3^* = \sigma_3/(1 - D_3)$$
 (8)

由此确定岩石微元所受载荷为:

$$\sigma = \sigma_1^* - \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi} \sigma_3^* \qquad (9)$$

由式(7)、(8)和(9),不考虑损伤各向异性得:

$$\sigma = \frac{\sigma_1}{1-D} - \frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi} \left(\frac{\sigma_3}{1-D}\right)$$
(10)

不考虑初始损伤,固定 σ<sub>1</sub> 和 φ 不变,可以看出 微元所受载荷随微元围压增加而减小,所以离围岩 临空面越近微元围压越小,微元所受载荷越高,围岩 损伤越严重。求出微元所受载荷后,由式(3)知,损 伤破坏的程度进一步与围岩完整程度和抗压强度有 关,以上分析与已有的理论分析结果和现场情况是 一致的。

### 2 围岩临界破坏概率

巷道开挖后,应力重新分布,微元所受载荷发生 变化,在应力集中区,微元所受载荷增加明显,导致 微元损伤增加,在拉应力区微元极易损伤,那么微元 损伤增加到什么程度将导致宏观破坏,需要确定临 界损伤量。岩石材料在损伤断裂过程中表现出逾渗 行为,基于标度变换的重正化群方法可用于研究材 料由于损伤而渐进破裂的过程,根据重正化群理论, 系统在逾渗阈值处有尺度变换下的不变性质,利用此 性质可得到临界破裂概率。考虑网络单元服从 Weibull 分布, 文献 [9] 中将岩石断裂面抽象为一单位 边长的正三角形网络,其中一级单元由4个基本单元 组成,二级单元由4个一级单元组成,考虑单元间的 应力转移,得出了重正化群计算的结果为0.1707,文 献[10]考虑二级单元中包括两个一级单元,两个一 级单元破坏导致二级单元破坏,考虑破裂单元应力 传递对尚未破裂的同级单元的影响,得出临界破裂 概率为0.2603,文献[11]考虑了破坏单元对临近非 破坏单元的影响,并且研究了非均质性的影响。

临界损伤值与非均质性关系密切,依据文献 [11]的方法,通过迭代方程求得均质度 m 为 1.5, 2,3,5,6,10,12 和 18 时,系统临界破坏概率分别为 0.2286,0.1707,0.1154,0.0672,0.055 和 0.0313, 0.026 和 0.018。从图 1、图 2 也可以看出,伴随均 质度增加,系统临界破坏概率越来越小。随着均质 度的提高,损伤虽然不断延后,但围岩本身对损伤却 越来越敏感。

## 3 数值试验与分析

RFPA 是由东北大学岩石破裂与失稳研究中心 开发,能模拟岩石在受载过程中其内部微细破裂产 生到不断发展并导致最终的宏观破裂的过程。其显 著特点之一是在细观统计力学的基础上充分考虑地 质体材料的非均匀性,采用 Weibull 分布描述微元 体力学性质(如弹性模量、强度、泊松比等)的非均 匀性,通过单元的弱化来模拟材料变形破坏的非连 续性,是一种运用连续介质力学方法解决非连续介 质力学问题的新型数值分析方法,具有应力分析和 破坏分析两大功能。在加载过程中,由于单元的破 坏是脆性的,因此将单元破坏释放的弹性能看成是 声发射所释放的能量,考虑到岩石的声发射(微震) 是介质微破裂的产物,根据声发射率与损伤具有一 致性的假设,可以通过统计破坏单元数和释放的能 量来研究声发射的时空发展规律<sup>[12]</sup>。因此,用 RF-PA 软件模拟本文的问题是适宜的。

采用平面应变模型,模型尺寸为 2000 mm × 2000 mm,划分为 200 × 200 = 40000 个单元,开挖单 元数分别为 10 × 10、16 × 16 和 20 × 20 个。计算模 型中材料参数和边界条件见表 1。模型及加载方式 见图 3,垂直载荷未达到岩体统计平均抗压强度,整 个模拟过程是先施加水平和垂直载荷,不分级,然后 开挖巷道,观察整个巷道围岩声发射的情况。

表1 计算模型中材料参数和边界条件

试样号	加载方式	均质度 (m)	σ <sub>0</sub> (MPa)	E (MPa)	σ <sub>3</sub> (MPa)	σ <sub>1</sub> (MPa)
1	载荷	6	60	60000	10	30
2	载荷	12	60	60000	10	30
3	载荷	18	60	60000	10	30

损伤变量 D 表示材料劣化的状态, Kachanov 将 其定义为承载断面上微缺陷的所有面积  $A_a$  与初始 无损时的断面积 A 的比值,即为单元破裂数与划分 单元总数的比值,因此可知声发射数与损伤变量间 存在以下关系,即 D = n/N, n 为累积声发射数即材 料单元破坏总数, N 为整个截面 A 全破坏的累积声 发射事件总数即材料单元总数,因此,通过声发射数 完全可以得到巷道开挖后的围岩损伤量。从表1可 以看出,模拟载荷远未达到围岩的统计平均抗压强 度,声发射随开挖尺寸的变化见图4,从图中可知, 围岩卸荷后的损伤均随开挖尺寸增大而增大,均质 度越低围岩卸荷后的损伤越严重,与前面的围岩损 伤分析一致。图4中均质度为6时,在开挖尺寸为 20×20情况下的围岩已破坏,声发射数量很大,为 了更清楚说明其它点,图中在20×20点处取声发射 数为2000。自重应力场情况下,对于同一巷道形 状,随巷道开挖尺寸的增大,开挖面增加,围岩卸荷 面增加,围岩两帮切向应力和顶底板拉应力将增加, 从而导致围岩微元损伤增加。



图 4 声发射随开挖尺寸的变化

对于垂直载荷达到围岩统计平均抗压强度的 情况,这里同样采用平面应变模型,模型高、宽尺寸 为2000 mm×2000 mm,划分为200×200=40000 个 单元,直墙半圆拱巷道尺寸为巷道宽100 mm,巷道 高150 mm,垂直方向载荷采用60 MPa,围压载荷采 用30 MPa,整个模拟过程是先施加水平和垂直载 荷,不分级,然后开挖巷道,观察整个巷道围岩声发 射的情况<sup>[13]</sup>。图5为不同均质度下的围岩卸荷初 始声发射情况,从图5可见,随着高应力巷道围岩完 整性的提高,围岩卸荷初始声发射数增多,而且增加 的很明显,也就是说在垂直载荷达到围岩统计平均 抗压强度的情况下,开挖后的围岩损伤破坏和激烈 程度随均质性的提高而增强,这与前面的围岩损伤 分析结果是一致的,与文献[14]的试验和数值模拟 结果也是一致的。



图 5 不同均质度下的围岩卸荷初始声发射情况

#### 4 结 论

在假定微元强度服从 Weibull 分布的基础上, 针对围岩完整程度,分析了围岩损伤和围岩破坏临 界损伤变量,随后,运用岩石破裂过程分析软件 RF-PA,分别对不同均质度的巷道围岩损伤进行了数值 模拟。结果表明:

(1)对于围岩来说,均质度可以反映围岩系统的完整性,均质度越小,围岩越破碎,反之则越完整。 伴随围岩均质度(完整性)增加,起始损伤延后,临 界破坏概率越来越小,依据均质程度不同而存在一 个临界破坏概率;随着均质度的提高,损伤虽然不断 延后,但围岩本身对损伤却越来越敏感;

(2)在围岩微元所受载荷达到其统计平均抗压 强度前,均质度越低损伤值越大;在微元所受载荷达 到统计平均抗压强度后,均质度越高围岩损伤越严 重,危险率越高;对于形状相同的断面,围岩卸荷后 的损伤均随开挖尺寸增大而增大;围岩损伤破坏的 程度与围岩完整程度和抗压强度关系密切;

(3)基于微元强度服从 Weibull 分布的围岩微 元破坏概率和临界破坏概率分析结果与模拟结果是 一致的;

(4)围岩损伤破坏受很多因素的影响,比如不同的岩层、不同的围岩物理力学性质、不同的巷道断面、不同的开挖方式、尺寸和多场耦合等,本文的分析,对于更复杂的情况以及其它的情况,有很大的借鉴意义,对现场具有一定的指导意义。

参考文献:

[1] 李树春,许 江,李克钢,等. 基于 Weibull 分布的岩石损伤
 本构模型研究[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版),2007,
 22(4):65~68.

(下转第105页)

是一种多点随机优化技术,对实际问题的搜索空间 的大小变化适应能力、计算速度及全局优化特性有 很大改进,所得结果是令人满意的。将加速遗传算 法应用于投影寻踪评价模型中的优化问题,可以有 效地找到最佳投影方向,获得最佳投影值,为投影寻 踪优化问题的解决提供了一条新的思路。但是,加 速遗传算法的诸多运行参考选取方法尚缺乏理论指 导,这是今后研究的方向。

(3) 岩体可爆性分级的关键在于合理确定分级 评判指标,实际上,影响岩体可爆性的因素众多复 杂,在应用的过程中应尽量考虑各方面的影响因素, 以使分级结果更可靠。目前我国尚未有一套权威的 岩体可爆性分级评价标准,因此,如何建立一套岩体 可爆性分级评价标准仍是今后研究的重点。另外, 将投影寻踪回归用于岩体可爆性分级,目前尚处于 探索性阶段,还需要进一步研究和完善。

#### 参考文献:

- [1] 辛明印,璩世杰,陈煊年,等.南芬露天铁矿的岩体可爆性分级方法及其应用[J].工程爆破,2006,12(01):7~10.
- [2] 李雁翎. 铜坑矿 92 号矿体可钻性及可爆性研究[J]. 矿业研 究与开发,2004,24(2):60~62.
- [3] 范利华,璩世杰,尚留勇,等.基于模糊识别的岩体可爆性分级[J].矿业快报,2007,23(2):15~17.
- [4] 杨春丽,侯克鹏,孙栋梁.基于等价关系模糊聚类在岩石爆破 性分类中的应用[J].工程爆破,2005,11(2):14~16.
- [5] 邢占利,王子云,谢君琦,等.灰色关联分析在岩体可爆性分 级中的应用[J].矿业研究与开发,2006,26(3):79~81.
- [6] 文畅平,李 蓉. 岩体可爆性分级判别的属性测度模型及其 应用[J]. 工程爆破,2007,13(3):14~17.

(上接第43页)

- [2] 曹文贵,方祖烈,唐学军.岩石损伤软化统计本构模型之研究[J]。岩石力学与工程学报,1998,17(6):628~633.
- [3] 曹文贵,赵明华,田政海,岩石变形破坏全过程的概率损伤方 法研究[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版),2004,19 (4):21~24.
- [4] 李忠华,官福海,潘一山.基于损伤理论的圆形巷道围岩应力 场分析[J].岩土力学,2004,25(S):160~163.
- [5] 姜小春,刘升贵,静国梁,等. 深部围岩开挖损伤区数值模拟 研究[J]. 矿业研究与开发,2007,27(6):12~14.
- [6] 田运生,张舒畅,李战军. 岩巷爆破围岩损伤演化分析及损伤 判据的建立[J]. 黄金,2005,26(8):22~24.
- [7] 李树忱,李术才,朱维申,等.能量耗散弹性损伤本构方程及 其在围岩稳定分析中的应用[J].岩石力学与工程学报, 2005,24(15):2646~2652.

- [7] 蔡煜东,姚林声. 岩体可爆性等级判别的人工神经网络方法
   [J]. 爆破,1993,10(2):50~52.
- [8] 蔡煜东. 岩体可爆性等级判别的遗传程序设计方法[J]. 爆 炸与冲击,1995, 15(4):329~334.
- [9] 程绪涛,冯玉国. 岩体可爆性分级物元分析模型及其应用 [J]. 地质灾害与环境保护,2003, 14(2):57~59.
- [10] 王 硕,张礼兵,金菊良.系统预测与综合评价方法[M].合 肥:合肥工业大学出版社,2006.
- [11] 李祚泳.投影寻踪的理论及应用进展[J].大自然探索,1998, 17(1):47~50.
- [12] 周 明,孙树栋.遗传算法原理及应用[M].北京:国防工业 出版社,1999.
- [13] 王 颖,谢剑英.一种自适应蚁群算法及其仿真研究[J].系 统仿真学报,2002,(1):31~33.
- [14] 周永华,毛宗源.一种新的全局优化搜索算法-人口迁移算法(I)[J].华南理工大学学报:自然科学版,2003,31(3):1~5.
- [15] 苏怀智,吴中如,温志萍.基于神经网络和遗传算法的大坝安 全监控中的应用[J].大坝观测与土工测试,2000,24(3);7 ~9.
- [16] 付 强,赵小勇.投影寻踪模型原理及其应用[M].北京:科 学出版社,2006.
- [17] 金菊良,丁 晶.遗传算法及其在水科学中的应用[M].成 都:四川 大学出版社,2000.
- [18] 付强,门宝辉.推求水稻非充分灌溉下优化灌溉制度的新 方法——基于实码加速遗传算法的多维动态规划法[J].水 利学报,2003,(1):123~128.
- [19] 金菊良,杨晓华.标准遗传算法的改进方案 - 加速遗传算 法[J].系统工程理论与实践,2001,21(4):8~13.
- [20] 王祥厚,李程远. 岩石爆破性分级方法述评[J]. 建井技术, 2001,22(2):21~25.

**\*\*\*\***\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*

- [8] Chen Z, Tang C, Huang R. A double rock sample model for rock - bursts[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(6):991 ~ 1000.
- [9] 邵 鹏,张 勇,贺永年,等.岩石爆破逾渗断裂行为与块度 分布研究[J].中国矿业大学学报,2004,33(6):635~640.
- [10] 金 龙,王锡朝. 岩石材料新变破裂的重正化群方法研究
   [J]. 石家庄铁道学院学报,2001,14(4):47~50.
- [11] 陈忠辉,谭国焕,杨文柱.岩石脆性破裂的重正化研究及数值 模拟[J].岩土工程学报,2002,24(2):183~187.
- [12] 唐春安,王述红,傅宇方.岩石破裂过程数值试验[M].北京: 科学出版社,2003.
- [13] 张晓君,靖洪文.非均质性对高应力巷道围岩卸荷声发射的 影响[J].采矿技术,2008,8(5):45~46.
- [14] 祝方才,潘长良,曹 平.岩石结构对声发射影响的试验研究及数值模拟初探[J].有色金属(矿山部分),2002,52(2):17~19.