

岩石爆破破碎时间及微差起爆延时优化

张奇^a 杨永琦^b 于滨^b

(a 西安矿业学院 西安 710054)

(b 中国矿业大学 北京 100083)

摘要 利用分形理论分析岩石爆破的破碎时间,提出了岩石爆破破碎时间的计算方法和微差起爆延时优化的一种途径。

关键词 岩石爆破 微差起爆 分形几何

中图法分类号 TD 231.1⁽²⁰⁾

1 问题的提出

岩石在爆炸载荷作用下,经过一定的延时后发生破碎及抛掷。因此岩石爆破破碎时间是微差爆破延期时间中的重要组成部分。它与岩石爆破断裂速度和破碎过程有关^[1]。装药爆炸以后,爆炸裂缝由孔壁开始发展,同时也有从自由面向炮孔方向发展的裂缝。然而已有的爆破裂缝扩展速度实测数值都在数百米每秒至上千米每秒之间,如果按断裂速度和几何尺寸(最小抵抗)计算岩石爆破破碎时间,所得值与工程实际不吻合。因此,许多研究者在确定岩石爆破微差起爆时间中的岩石破碎时间时,乘上一个大于1的系数^[2],用这样一个经验系数来反映按爆破断裂扩展速度和几何尺寸(最小抵抗)计算破碎时间的差值。人们已经感觉到用爆破断裂扩展速度和几何尺寸(最小抵抗)计算破碎时间的不完善性,但尚不能从物理本质上定量地解释和描述断裂与破碎之间的联系和区别。我们试图用新的思路和方法解决这一问题。

目前还不能由数学解析和数值计算求得爆破载荷下岩石介质内断裂扩展速度随各因素(如炸药、岩石物理力学性质、位置)变化的规律。因此工程爆破参数设计中应用的爆破断裂速度基本上都来源于实测结果。而断裂速度的实测结果都是一定尺度上的径向裂缝的扩展速度。如果在同一尺度上考虑岩石爆破破碎问题,则破碎过程已不再是径向裂缝的扩展,而是三维空间的分形问题。

2 实验结果

文献[1]介绍了泥质页岩巷道中岩石爆破破碎时间的实测资料:“当只存在有一个自由面时,岩石爆破开始运动的时间最小为6ms,最大的58ms,当有两个自由面时,岩石爆破开始运动的时间最小为3ms,最大为27ms。”按数百米每秒至上千米每秒的爆炸裂缝扩展速度计算得到的岩石爆破破碎时间最多也就是几毫秒,显然远小于实际值。

我们采用X射线高速摄影技术,在不耦合装药条件下观测圆柱形水泥砂浆试件的孔壁变

⁽²⁰⁾ 张奇:男,1956年4月生,博士,教授。
1996-05-06收到原稿,1998-02-04收到修改稿。

形及破碎过程。试件外直径为 40mm, 高为 200mm, 装药孔沿其轴线, 直径为 16mm, 孔深为 100mm, 装药为 8 号电雷管。试件装配如图 1 试件的静态单向抗压强度为 32MPa。电雷管起爆后, 首先作用在压力靶上, 开始计时。在 52 μ s 时可以看到试件有明显的破碎发生。试件的最小抵抗是 12mm, 如果爆炸裂缝的扩展速度为 1000m/s, 则破裂的时间为 12 μ s。显然按断裂时间计算破碎过程难以解释实验结果。被爆介质的破碎时间远大于径向裂缝的扩展时间。径向裂缝扩展速度是一条连续的裂缝沿径向扩展的速度值。而爆破破碎是诸多裂缝组合的结果, 其中有些裂缝可能是间断的, 这些裂缝不完全是径向发展的。

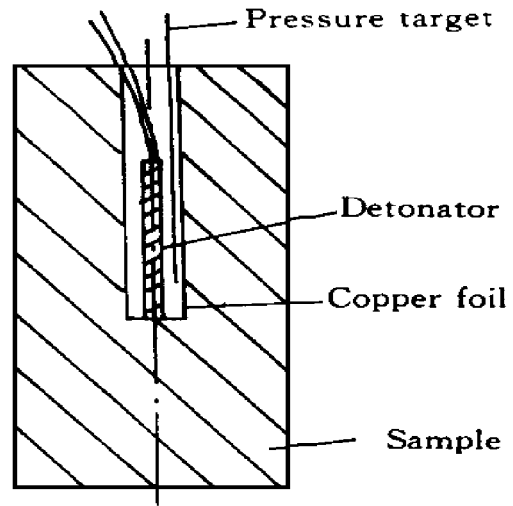


图 1 试件装配示意图

Fig. 1 Schematic diagram for sample

3 岩石爆破的破碎过程

岩石在爆炸载荷作用下破碎成尺寸和形状都不规则的碎块, 块度大小分布的规律性可以用分形几何理论来描述。

关于爆炸裂缝扩展速度的计算, 目前还不能考虑裂缝发展路径的随机性和不规则性, 总是把断裂路径作为直线处理, 这与岩石爆破断裂路径有较大差别。无论是光测还是电测实验的爆破裂缝发展速度, 都是某一平面内的宏观速度值, 它同样也不可能完全反映出断裂路径的不规则性。岩石爆破破碎的实际过程是在欧氏三维空间内发展的, 因此岩石爆破破碎过程与爆炸裂缝扩展(计算和实测结果)尚存在区别。由于爆炸裂缝发展速度的计算理论还很不完善, 远远满足不了工程爆破参数设计的需要。而爆破断裂过程的实验技术已较为成熟, 有工程应用的可能和基础。我们以实测可能得到的平面内的爆炸裂缝扩展速度为基础, 根据分形几何理论将其折算成欧氏三维空间内爆炸裂缝的扩展速度, 然后确定爆破破碎过程所需要的时间。

根据分形几何原理, 可以在岩石爆破断裂中建立考虑了欧氏三维空间内分形效应的扩展速度与未考虑分形效应的爆炸断裂速度之间的关系

$$l_b = L_b W_b^{d_b - 1} \quad (1)$$

式中: W_b 是爆破块度的分形尺码(无量纲量); d_b 是岩石爆破块度分布的分形维数; L_b 是在某一平面上实验测得的爆炸裂缝扩展宏观速度值。岩石爆破破碎轨迹是一条分形曲线, 相对应的直线长度为

$$l_b = \int_0^t L_b W_b^{d_b - 1} dt \quad (2)$$

式中: t 是时间。在爆破断裂过程中, 裂缝扩展速度 L_b 与岩石的物理力学性质、装药及装药结构、时间等多种因素有关。目前这方面的研究还很不系统。如果认为爆破断裂扩展速度 L_b 与时间无关, 则(2)式变为

$$t = l_b / (L_b W_b^{d_b - 1}) \quad (3)$$

如果用上式来计算岩石爆破的破碎时间, t_b 可以代以破碎范围 (尺寸), 但在有自由面的情况下, 爆破破裂由炮孔开始, 同时也有从自由面向炮孔方面发展的爆破裂缝。因此在这种情况下确定爆破的破碎时间, t_b 应减小, 减小的程度取决于自由面与炮孔两处开始破裂的时间差。如两者同时开始破裂, 则 t_b 应取最小抵抗的 1/2。在岩石爆破破碎时间的计算中, 关键是 W_b 和 d_b 的确定。可以通过岩石爆破块度的 G-G-S 分布函数来确定 d_b 和 W_b 。爆破块度 G-G-S 分布函数为

$$y = (x/x_m)^n \quad (4)$$

式中: y 是岩石爆破块度小于 x 的累积相对量; x 是岩石爆破块度 (筛网孔径) 尺寸; x_m 是 $y=100\%$ 时的块度尺寸; n 是岩石爆破块度分布参数。

根据分形理论, 在单位体积内, 爆破块度分形尺码 $W_b > W_b$ 的碎块数量为

$$N_b(W_b > W_b) = W_b^{-d_b} \quad (5)$$

由于岩石爆破碎块是爆炸裂缝扩展的结果, 因此爆破断裂轨迹分布在欧氏三维空间内的分形维数与岩石爆破碎块分布的分形维数相等。爆破块度分形尺码与碎块尺寸之间有下列关系

$$W_b = K x \quad (6)$$

式中: K 是比例系数, 量纲为 L^{-1} 。由上两式得

$$N_b(W_b > W_b) = (K x)^{-d_b} \quad (7)$$

$N_b(W_b > W_b)$ 表示岩石爆破尺寸为 x 的筛上相对累积量的碎块数; $y(x)$ 表示岩石爆破块度尺寸为 x 的筛下相对累积量 (体积比), 体积比的增量 $dy(x)$ 折合成尺寸为 x 的碎块数, 应有

$$dN = \frac{dy(x)}{(x/x_m)^3} = \frac{nx^{n-4}}{x_m^{n-3}} dx \quad (8)$$

随着 x 增大, 筛上相对量的碎块数将减少, 由 (7) 式可得减少量

$$dN_b = -d_b (K x)^{-d_b-1} K dx \quad (9)$$

对于爆破块度尺寸 x , 筛下相对量的碎块数目增量刚好等于筛上相对量碎块数量的负增量

$$dN = -dN_b$$

即

$$nx^{n-4} x_m^{3-n} = d_b K^{-d_b} x^{-d_b-1} K \quad (10)$$

对于任意 $x (x \leq x_m)$ 上式都成立的充要条件是

$$d_b = 3 - n \quad (11)$$

由上两式还可得

$$K = \frac{n}{d_b x_m} \quad (12)$$

代入 (6) 式, 有

$$W_b = \frac{nx}{d_b x_m} \quad (13)$$

x 的取值范围是 $0 < x \leq x_m$ 。 W_b 取值越小, N_b 越大。为了全面反映岩石爆破后的块度分布, 在 (13) 式中取 $y(x) = 50\%$ 时的碎块尺寸 $x = \bar{x}$, 代入

$$W_b = \frac{n\bar{x}}{d_b x_m} \quad (14)$$

d_b 和 W_b 分别由 (11) 式和 (14) 式确定。已知爆破断裂扩展速度, 就可以由 (3) 式求出被爆介质破

碎范围内所需要的爆破破碎时间 t

文献 [4] 介绍了 20 次台阶爆破块度分布的实测结果。其中 $n \approx 1$, $\bar{x}/x_m \approx 0.1$ 岩石爆破的最小抵抗不同, 爆破块度的分布规律也不同。如果按上述参数计算, 爆破块度的分维数和分形特征尺码为 $d_b = 2$, $W = 0.05$ 由此近似估算小抵抗线条件下的爆破破碎时间。取破碎范围 $b = 0.5\text{m}$; 岩石爆破断裂扩展速度 $L_b = 1000\text{m/s}$ 则由 (3) 式可求出爆破的破碎时间 $t = 10\text{ms}$ 在数量级上与实测结果 [1] 吻合。当爆破破碎范围 $b = 0.25 \sim 2.5\text{m}$ 时, 相应的破碎时间 $t = 5 \sim 50\text{ms}$

文献 [5] 的一组小台阶爆破试验参数和爆破块度 $G-G-S$ 分布指数为: $n = 0.62 \sim 1.01$, $d_b = 2.38 \sim 1.99$ 如果取 $b = 0.5\text{m}$, $L_b = 1000\text{m/s}$, $\bar{x}/x_m = 0.1$ 则破碎时间 $t = 9.56 \sim 73.5\text{ms}$ 这一结果与实测结果相吻合。

从 (3) 式可以看出: 岩石爆破破碎时间与爆破范围有关, 与爆破的自由面条件有关, 在无自由面时, b 与爆破范围的最大尺寸相同, 当有自由面时, b 小于爆破范围的最大尺寸; 岩石爆破破碎时间与爆炸裂缝的扩展速度有关, 爆炸裂缝扩展速度是炸药单耗、岩石物理力学性质的函数, 并且随距离而变化; 岩石爆破破碎时间还与爆破破碎块度有关, 与块度分布规律有关。人们控制爆破参数的目的之一是控制爆破破碎块度。微差爆破延期时间是一个重要的爆破参数, 以前对微差起爆延期时间的认识只是基于爆破地震、抛掷作用的控制, 而根据爆破块度分布规律预测预报、优化爆破效果, 选取相应的微差时间, 是本文得出的重要成果。在微差爆破延期起爆时间中, 岩石爆破破碎时间是其中最主要的部分, 也是难以量化计算的部分。我们在本文中较好地解决了这一问题。

裂隙性岩体的爆破破碎过程不完全是断裂扩展的结果, 其中包含大量原生的裂缝, 这些裂缝与爆破过程中产生的爆炸裂缝组合在一起, 构成的破碎过程不能完全用 (3) 式来计算。这个很有现实意义的课题, 有待深入的理论研究。

4 结束语

过去的爆破理论无法解释岩石爆破破碎时间的实测数据。我们提出的理论和计算方法不仅揭示了岩石爆破破碎物理过程的本质——破碎过程的分维性, 而且计算结果与实测值相吻合。这说明了计算方法的可靠性, 为微差爆破机理研究和微差爆破延期时间优化提供了理论基础。

爆炸载荷下岩石的破碎时间可以由爆炸裂缝的宏观扩展速度和爆破块度的分布规律来确定, 后者与爆破块度的预测预报相联系, 而前者目前尚缺乏系统的研究成果。在爆破块度优化设计时, 除了对装药量、爆破几何参数进行控制以外, 还应该注意到对微差起爆时间的控制。

参 考 文 献

- 1 王文龙. 钻眼爆破. 北京: 煤炭工业出版社, 1984. 238
- 2 宗琦, 刘积铭. 炮孔装药分段爆破的模型实验研究. 爆破, 1997, 14(3): 8
- 3 Ted L. A. Sun Yongqi The Mechanics of Fractal Damage A FOSR-90-0373 1992
- 4 谭英显, 周百川, 黄国君. 控制爆破粒度实现块粉平衡. 见: 徐小荷, 等编. 岩石破碎理论与实践. 西安: 陕西科学技术出版社, 1993. 407
- 5 杨军, 王树仁. 分形几何在岩石破碎分布中的应用. 见: 徐小荷, 等编. 岩石破碎理论与实践. 西安: 陕西科学技术出版社, 1993. 370

ROCK BREAKING TIME BY BLASTING AND OPTIMIZATION OF DELAYING TIME OF SUCCESSIVE BLASTING

Zhang Qi^a, Yang Yongqi^b, Yu Bin^b

(^aXi'an Mining Institute, Xi'an, 710054)

(^bChina University of Mining and Technology, Beijing, 100083)

ABSTRACT The rock breaking time by blasting is analysed by use of fractal theory in this paper. The calculation method for rock breaking time by blasting and the new way to optimize delaying time in successive blasting are found.

KEY WORDS rock blasting, successive detonation, fractal theory