

控制断裂能量与爆破效果的分形分析^{*}

张 奇 杨永琦

(中国矿业大学北京研究生部 北京 100083)

摘要 定向断裂爆破与普通光爆、预裂相比,爆破效果明显提高,爆破能量利用更为合理。文中根据爆破断裂的分形研究,阐述了控制断裂爆破改进周边成形质量,提高爆炸能量利用率的力学机制。

关键词 岩石断裂 爆破 分形 炸药

中图法分类号 TD 235 37

1 引 言

控制断裂爆破技术始于本世纪 80 年代^[1],近年来受到我国爆破工作者的重视,发展较快,已逐步应用于巷道掘进^[1]、石材开采等工程领域,取得显著的经济效益和社会效益。中国矿业大学北京研究生部与大同矿务局协作,在软岩巷道施工中,采用定向断裂爆破新技术,使眼痕率从 30%~40%,提高到周边眼痕率 95% 以上,不平整度小于 100mm,炮孔利用率达 98%,爆破效率明显提高。每米巷道成本节约近千元,我国仅煤炭系统每年掘进岩巷 1800km,在不增加设备及投资的情况下,推广这一新工艺,即可取得巨大效益,应用前景广阔。定向断裂爆破虽然在工程中获得了成功,但它的机理研究并不完善。定向断裂爆破可以使用周边孔距增大,钻爆费用降低。周边成形质量的改善,使掘进工程量减小,从而节省了支护成本。

定向断裂爆破技术有两个主要特点:一是炮孔间距增大;二是周边成形规整,不平整度明显减小。前者在理论上曾有的一些研究,一般认为炮孔间距增大是由于定向断裂爆破可使某一特定方向断裂压力强度因子增大。但对此缺乏定量的描述,特别是目前尚不能由此得到孔距增大的数学关系式。通过对炮孔周围爆破断裂过程的分析可知,某一方向的断裂压力强度因子较大,只发生在爆炸过程初期,在爆破的中、后期(中、远区),这一方向的断裂应力强度因子不可能比其他方向有明显区别。因此用断裂应力强度因子来解释定向断裂爆破炮孔间距增大的观点值得商榷。至于定向断裂爆破技术的第二个特点,不平整度降低的原因及作用目前还没有研究。我们利用分形几何及断裂力学理论,探讨定向断裂可以改善爆破效果、增大炮孔间距的力学机制。

2 定向断裂能量释放率

根据岩石破裂几何学,不同尺度的岩石破裂几何都是分维数^[2]。我们认为,分形无标

* 国家自然科学基金和国家教委博士点基金资助项目。

1995 年 9 月 27 日收到原稿,1996 年 1 月 22 日收到修改稿。

度区特征尺寸范围除要考虑分维条件外, 更要考虑研究对象的尺寸范围。岩石的断裂是从晶体尺寸开始的, 但是对爆破断裂来说, 断裂面的不平整度如果以晶体尺寸来衡量显然是无意义的。此外, 从晶体尺寸来确定分维也不如宏观尺寸容易。因此, 我们在利用分形理论分析定向断裂过程中, 根据不平整度 (分米量级) 和炮孔间距 (米量级) 的相对比值来确定分形的特征尺寸。

对于脆性材料, 单位厚度平滑裂缝扩展单位长度释放的能量为

$$G_c = 2V_s$$

式中 V_s 是断裂面单位面积的表面能。由于岩石断裂是分形, 真实断裂面大于表观断裂面, 根据分形理论, 参考文献 [3], 可导出考虑分形条件下的能量释放率

$$G_c = 2V_s \left(\frac{W}{l}\right)^{1-d} \tag{1}$$

式中: W 为分形量测尺码, m ; l 可取为单位长度, m ; d 为断裂面的分维数。

爆破断裂面的不平整度越大, 分形维数越高, 断裂单位面积所释放的能量也越高。对于同种岩石, 如果两种爆破方法产生的断裂面所对应的分形维数分别用 d_1 和 d_2 表示, 则由 (1) 式得

$$\frac{G_{c1}}{G_{c2}} = \left(\frac{W}{l}\right)^{d_2-d_1} \tag{2}$$

式中: G_{c1} 和 G_{c2} 分别是两种爆破方法产生单位面积断裂面所释放的能量, 其中 G_{c1} 与 d_1 对应, G_{c2} 与 d_2 对应。(2) 式计算结果如表 1

表 1 断裂分维对能量释放率的影响 (G_{c1} 、 G_{c2} , %)

Table 1 Effects of fractal dimension on released energy per square meters (G_{c1} 、 G_{c2} , %)

$d_2 - d_1$	W/l					
	0.001	0.002	0.004	0.01	0.1	0.2
0.1	50	54	58	63	79	85
0.2	25	29	33	40	63	72
0.3	13	15	19	25	50	60
0.4	6	8	11	16	40	52
0.5	3	4	6	10	32	45

由表 1 可以看出, 断裂面的特征尺寸和分形维数对断裂需要的能量有重要影响。两种爆破方法产生的断裂面分维差值越大, 断裂所需能量的差值也越大。断裂面断裂所需的总能量为

$$G = G_c \cdot A$$

式中 A 为断裂面的表观面积。对于两种爆破方法, 分别有

$$G_1 = G_{1c} \cdot A_1 \tag{3}$$

$$G_2 = G_{2c} \cdot A_2 \tag{4}$$

在装药量和炮孔堵塞条件相同的情况下, 用于炮孔连心线形成贯通裂缝的总能量是

相等的。因此由 (3)、(4)式及 (2)式得

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{G_{2c}}{G_{1c}} = \left(\frac{W}{l}\right)^{d_2-d_1} \tag{5}$$

对于同样的炮孔深度, (5)式可进一步变为

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{G_{2c}}{G_{1c}} = \left(\frac{W}{l}\right)^{d_2-d_1} \tag{6}$$

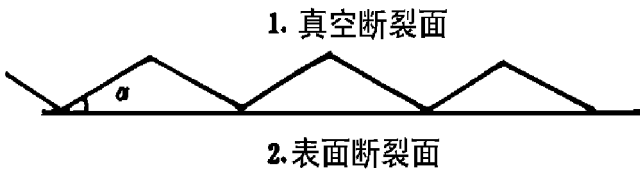
式中 S_1 、 S_2 分别表示两种爆破方法所对应的炮孔间距。定向断裂爆破, 使巷道周边的不平整度明显降低^[1-4], 因此炮孔间距可以增大。根据光面爆破和定向断裂爆破巷道周边的不平整度, 可以求出相应断裂面上的分形维数, 由 (6)式即可比较两种爆破方法炮孔间距的相对值。对于井下光面爆破, 不平整度小于 150mm 为合格, 再考虑到炮孔间距, 分形尺码 W/l 取 0.1左右较适合, 由 (6)式和表 1可知, 当断裂面的分形维数相差 0.1~0.5时, 两种爆破方法的炮孔间距之比为 1.25~3倍。

在实验室利用有机玻璃和水泥试件进行实验, 采用切缝药包、线性聚能装药和孔壁切槽模拟定向断裂爆破, 并与普通光面爆破实验结果相对比, 发现定向断裂爆破的炮孔间距一般是普通光面爆破或预裂爆破的 2~3.5倍。如果定向断裂爆破与普通光面爆破产生断裂面的分形维数差值为 0.1~0.5那么理论与实验结果就能吻合。下面讨论定向断裂与普通光爆断裂面分形维数的计算方法。

3 断裂面分形维数及分析

在实际工程中, 岩石断裂面分形维数的测定并不容易。而不平整度比较直观较易测定。为了分析分形维数对炮孔间距的影响, 如能给出不平整度与断裂面分形维数间的关系, 将便于问题的分析和处理。

岩石的断裂都是以“Z”字形发展的^[3]。不妨把光面爆破沿炮孔连心线方向产生的贯通裂缝抽象为一条折线(图 1)。根据自相似分形维数值的定义, 有



$$d = \frac{\ln N}{\ln(1/r)} \tag{7}$$

式中: N 是分形曲线构成生成元的等长直线段条数; $1/r$ 是生成元两端的距离与等长直线的长度比。T是折线与表观断裂线的夹角(如图 1)。对图 1的分形曲线, 有 $N = 2 / 1/r = 2 \cos T$,

图 1 断裂面的形式

Fig. 1 Shape of the crack surface

1 Real crack surface 2 Apparent crack surface

代入 (7)式, 可以得出断裂面的分形维数。

当 $T = \text{tg}^{-1} 4/5$ 时, $d = 1.56$ 当 $T = \text{tg}^{-1} 3/5$ 时, $d = 1.28$

当 $T = \text{tg}^{-1} 2/5$ 时, $d = 1.12$ 当 $T = \text{tg}^{-1} 1/5$ 时, $d = 1.03$

设断裂面的凹凸度为 Δ , 如果按炮孔间距 $S = 0.5\text{m}$ 考虑, 则 Δ 的最大值可能为:

当 $T = \text{tg}^{-1} 1/5$ 时, $\Delta = 0.05\text{m}$; 当 $T = \text{tg}^{-1} 2/5$ 时, $\Delta = 0.1\text{m}$; 当 $T = \text{tg}^{-1} 3/5$ 时, $\Delta = 0.15\text{m}$; 当 $T = \text{tg}^{-1} 4/5$ 时, $\Delta = 0.2\text{m}$ 。

参考表 1, 如果断裂面的分形特征尺寸按 $W/l = 0.1$ 考虑, 不平整度 $\Delta = 0.05\text{m}$ 与超挖 $\Delta = 0.1\text{m}$ 之间的分维差值 $d_2 - d_1 = 0.1$, 代入 (6) 式得炮孔间距提高到原来的 1.25 倍。

$\Delta = 0.05\text{m}$ 与 $\Delta = 0.15\text{m}$ 所对应的断裂面分维差值 $d_2 - d_1 = 0.25$, 炮孔间距可以提高到原来的 2 倍。

$\Delta = 0.05\text{m}$ 与 $\Delta = 0.2\text{m}$ 所对应的断裂面分维差值 $d_2 - d_1 = 0.52$, 炮孔间距可以提高到原来的 3 倍。

$\Delta = 0.1\text{m}$ 与 $\Delta = 0.15\text{m}$ 所对应的断裂面分维差值 $d_2 - d_1 = 0.16$, 炮孔间距可以提高到原来的 1.4 倍。

$\Delta = 0.1\text{m}$ 与 $\Delta = 0.2\text{m}$ 所对应的断裂面分维差值 $d_2 - d_1 = 0.44$, 炮孔间距可以提高到原来的 2.7 倍。

$\Delta = 0.15\text{m}$ 与 $\Delta = 0.2\text{m}$ 所对应的断裂面分维差值 $d_2 - d_1 = 0.28$, 炮孔间距可以提高到原来的 3 倍。

定向断裂爆破改善了断裂壁面的光滑程度, 炮孔间距可以明显提高。

4 定向断裂爆破改善周边成形质量的力学机制

定向断裂爆破壁面的不平整度小于普通光面爆破, 原因在于它的成缝机理。在普通光面爆破中, 无论相邻两孔是否绝对同时起爆, 炮孔连心线上的裂缝总是从孔壁开始发展的。在装药爆炸作用下, 孔壁周围的径向裂缝是随机发展的。如果两孔绝对同时起爆, 爆炸应力波相遇以前, 各自炮孔周围已产生径向裂纹, 该裂纹不一定是沿连心线方向的, 应力波相遇后, 才可能在炮孔连心线方向造成断裂沿连心线优先发展的趋势, 迫使初始径向裂纹在该方向上优先扩展, 在相邻孔中部贯通。图 2 是相邻孔同时起爆的动光弹拍摄的应力条纹, 其中可以看到应力波在中部相遇后的叠加状态, 但裂缝是由孔壁开始扩展的, 图 3 是相邻孔同时起爆后, 最终的爆破结果。



图 2 两孔同时起爆的动光弹等差应力条纹
Fig. 2 Dynamic photoelastic fringe pattern with equal stress difference under accurate simultaneous detonation of two blastholes

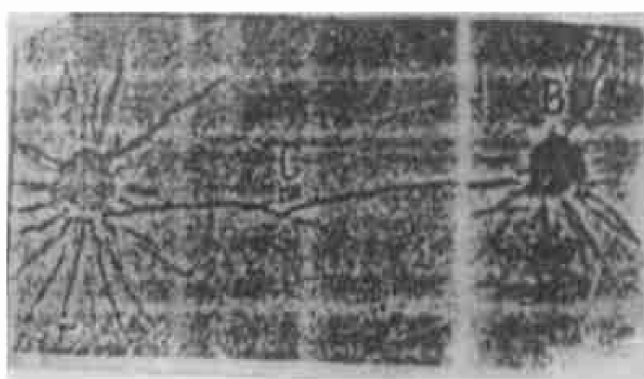


图 3 两孔绝对同时起爆的爆破结果
Fig. 3 Blast result under accurate simultaneous detonation of two blastholes

对于普通光爆, 如果两孔非绝对同时起爆, 先爆孔在孔壁周围产生随机裂缝, 有的裂缝与后爆孔的爆炸裂缝相交, 形成贯通裂缝势必影响壁面的光滑程度。

定向断裂爆破在特定方向上, 可以首先在孔壁处产生定向裂纹, 起到断裂导向的作

用, 该方向的裂缝优先于其他方向扩展延伸。消除了普通光爆和预裂爆破贯通裂缝启裂和扩展的随机性, 提高了断裂壁面的光滑程度, 使断裂壁面所需的断裂能量减少, 从而增大定向断裂爆破的炮孔间距。

5 结 语

定向断裂爆破有利于提高巷道周边的成形质量, 形成光滑壁面。当井巷周边的不平整度从 0.1m 减小到 0.05m 时, 断裂能量可以节省 25%, 炮孔间距可以增大 25%; 当不平整度从 0.2m 减小到 0.05m 时, 断裂能量可以节省 32%, 炮孔间距增大 2 倍。大量现场生产试验已经证明, 定向断裂爆破的周边不平整度远小于普通光爆, 孔距明显大于普通光爆^[1-4]。具有良好的推广前景, 是继光面爆破后, 在井巷掘进爆破中的又一次新的突破。

参 考 文 献

- 1 杨永琦, 等. 岩巷定向断裂爆破理论与实践. 中国矿业大学学报 (英文版), 1995, 2(2): 1
- 2 陈 颢, 等. 分形与浑沌在地球科学中的应用. 北京: 学术期刊出版社. 1989: 120
- 3 谢和平. 岩石混凝土损伤力学. 徐州: 中国矿业大学出版社. 1990: 261
- 4 王树仁, 等. 光面爆破和预裂爆破技术改进. 见: 中国矿业大学研究生部教学科研论文集. 徐州: 中国矿业大学出版社. 1988: 31

FRACTAL ANALYSE ON CONTROLLED CRACK ENERGY AND BLAST EFFECTS

Zhang Q i Y ang Y ongqi

(Beijing Graduate School of CUM T, 100083)

ABSTRACT Compared with the conventional smooth blast and presplit methods, the controlled fracture blast has better result, the blast energy of which is made more rational use of. According to the study on the blast crack by fractal analysis, the mechanism improving periphery appearance and increasing the utilized explosion energy ratio by the controlled fracture blast is presented.

KEY WORDS rock crack, blast, fractal explosive