

# 某露天采场爆破震动特性及减震技术研究

林大能<sup>1,2</sup>, 陈寿如<sup>2</sup>, 刘优平<sup>2</sup>

(1. 湖南科技大学能源与安全工程学院, 湖南湘潭 411201;

2. 中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083)

**[摘要]** 为解决某露天采场高陡边坡受生产爆破震动的影响, 根据该采场的岩石性质和爆破规模, 对采场进行了爆破振动测试, 得出了该区域爆破地震波的传播特性, 揭示了该矿区的爆破振动速度与药量和测点位置的关系, 爆破振动速度随相对高程的增大而存在放大效应, 放大系数的变化率随高程的增加而减小; 通过控制段起爆最大药量, 采用时差干扰降震技术较好地解决了生产规模与震动安全控制问题; 现场试验表明, 该矿的最佳段差时间为 15 ms, 平均降震率达到 23.6%。

**[关键词]** 露天采场; 爆破震动; 高程效应; 段起爆药量; 时差干扰降震

**[中图分类号]** TD 235.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2006)06-0073-05

某钢厂一采场为年产  $400 \times 10^4$  t 原矿的国内大型深凹露天铁矿。目前已形成高度为 200 m 的固定边坡。随着开采深度下降, 今后将形成高达 400 m 的最终边坡。在以往的开采中, 临近固定边坡基本没有使用预裂爆破, 采用垂直炮孔进行缓冲爆破和浅孔爆破削坡, 致使固定边坡不平整, 甚至受到一定程度的破坏。目前该采场固定边坡处于高度大、范围广、岩性复杂、平整性差和负荷重的不稳定状态。控制和降低临近固定边坡爆破地震, 成为该矿进一步安全生产及可持续发展的关键问题之一。爆破地震波在该区域的传播规律研究是进一步分析高陡边坡动力响应和稳定性分析的基础。笔者介绍了对该采场进行爆破振动测试的方法, 并对爆破震动的规律进行了分析, 提出了控制段最大起爆药量和段差干扰降震技术控制震动, 为现场的安全生产提供了保障, 解决了生产规模和控制爆破震动这一矛盾。

## 1 边坡地质概况和测点布置

某钢厂一采场固定边坡岩层大致分为坚硬岩石和软岩两大类, 坚硬岩石包括双透岩、绢云母石英

片岩、白云质灰岩、石英岩, 这一类岩层比较坚固, 结构完整, 受地质构造影响小。软岩包括有风化双透岩、千枚岩、双透化白云质灰岩、风化千枚岩, 受断层和风化作用, 容易产生滑坡。

为观测到一定范围内爆破地震物理量, 在离开爆心位置由近及远的距离上都得布置测点, 测点的选择要考虑便于测量仪器的安放, 也要考虑测点的代表性。因此, 测点的布置原则是尽量将测点位置选择在与爆源和坡面正交的同剖面不同高度的台阶面上。

## 2 爆破地震测试

### 2.1 爆破地震强度物理量

描述爆破地震强度的物理量主要包括质点的位移、速度、加速度和频率, 何种参数作为评价爆破地震强度的物理量, 尚无统一认识。传统观点认为用振动速度作为判据比较可靠; 瑞典的评判标准则综合考虑了振速、频率、位移、加速度等多项指标; 美国矿业系统、德国和芬兰的判据则综合考虑了振速和频率指标。我国 2003 年 9 月 12 日颁布, 2004 年 5 月 1 日开始实施的《爆破安全规程》

(GB6722-2003) 中的爆破震动危害的评价标准中, 也考虑了振速和频率两个指标<sup>[1]</sup>。笔者在其他项目的研究中提出了用动态应力比作为分析岩石边坡稳定性的指标, 其实质是通过测试某点的质点振动速度, 确定该点的动态应力或拉应力, 以及剪切应力(公式 1~4), 再将动态应力与介质的强度进行比较来分析边坡的稳定性<sup>[2]</sup>。

$$c_p = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (1)$$

$$c_s = \sqrt{\frac{E}{\rho} 2 \frac{1}{(1+\mu)}} \quad (2)$$

式中:  $c_p$  为岩体中横波速度 ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ );  $c_s$  为纵波传播速度 ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ );  $E$  为岩体的弹性模量 ( $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ );  $\rho$  为岩体的密度 ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ );  $\mu$  为岩体的泊松比。

$$\sigma = \rho c_p v_p \quad (3)$$

$$\tau = \rho c_s v_s \quad (4)$$

式中:  $\sigma$  为拉压应力 (Pa);  $\tau$  为剪切应力 (Pa);  $v_p$  为横波振速 ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ );  $v_s$  为纵波振速 ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )。

爆炸引起岩石内部质点的震动有垂直、径向和切向三个速度分量, 大量实测表明, 切向振动速度较小, 垂直和径向振速较大, 比较之下垂直振速最大<sup>[3-5]</sup>, 因此本测试中测试测点的垂直振速。

## 2.2 测试仪器与测点埋设

选用长江科学院爆破与地震研究所的 YBJ-1 型爆破震动记录仪, 速度计选用北京仪器厂生产的 CD-1 型速度计, 频率范围为 10~500 Hz。这套系统具有轻便、无需要联接线和操作简便等特点, 并有专用软件读取和分析处理记录仪的数据, 使用十分方便<sup>[6,7]</sup>。

为了能准确分析处理测试结果, 在土层或松石层埋设测点时, 应挖开松石层或土层至基岩, 否则用钢钎打入至坚实的土层, 然后将传感器固定在钢钎上; 对基岩表面, 先将表面洗干净, 然后用砂浆抹平。测震前用石膏粉加水固定速度传感器。

## 2.3 爆破地震测试条件

对南帮 2 号剖面爆破震动进行测试, 爆心的高程均为 294.00 m。选用主装药为铵油炸药, 起爆药包为乳化炸药。基本条件见表 1。各测点测得的平均振速和平均主频见表 2。

# 3 爆破震动规律分析

## 3.1 不考虑高程效应时的爆破震动回归分析

表 1 震动测试基本参数

Table 1 Principle parameters of vibration testing

测点号	测点高程 $h/\text{m}$	直线距离 $r/\text{m}$	水平距离 $s/\text{m}$	药量/kg
1-1	322.65	92.62	90.29	559.0
1-2	356.03	148.39	134.80	559.0
2-1	344.94	274.34	269.54	308.0
2-2	322.65	241.39	239.68	308.0
3-1	322.65	66.70	60.23	494
3-2	344.94	108.61	95.92	494
3-3	367.02	136.08	114.83	494
3-4	377.84	150.63	124.81	494
3-5	356.03	122.62	105.78	494
4-1	367.03	153.94	135.52	494
4-2	356.03	154.61	141.69	494
4-3	322.65	100.32	96.15	494
4-4	377.84	170.63	148.61	494
5-1	356.03	185.85	170.90	494
5-2	367.03	189.52	174.89	494
5-3	322.65	139.46	136.49	494

根据《国家爆破安全规程》及国内外研究成果, 爆破震动传播与衰减规律一般采用萨道夫斯基经验公式<sup>[1,8-11]</sup>:

$$v = K \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{r} \right)^\alpha = K\eta^\alpha \quad (5)$$

式中:  $K$  为与地质、爆破方法等因素有关的系数;  $\alpha$  为与地质条件有关的地震波衰减系数;  $Q$  为与峰值振速  $v$  值相对应的最大一段起爆药量 (kg);  $r$  为测点与爆心的直线距离 (m);  $\eta$  为比例药量。分析时,  $K, \alpha$  为待求系数。

## 3.2 考虑高程放大效应时的爆破震动回归分析

高程放大效应是指爆破引起的质点振动速度随着测点与爆心高程差增大而增大的现象。爆破震动速度的高程放大效应不仅与边坡岩体的完整性、岩性、坡度、爆破规模等因素有关系, 而且与边坡山体厚薄有关系。当岩体完整性较好坡度较陡而爆破规模相对较大时, 在一些边坡上确实存在振速高程放大效应, 但这种放大只局限于一定高度范围内, 大多数情况下, 爆破振速均是随水平爆破中心距、高程及开挖深度增加而衰减的<sup>[12-14]</sup>。高陡边坡中, 不同的区域、不同的坡度、坡面对爆破地震波有着不同的响应。研究表明, 过爆心的坡面角平分线、坡面和边坡围成的区域, 爆破震动效应与坡度大小密切相关, 而其他区域则受坡度的影响较小。同时, 在受影响区域, 当坡度大于 1:2 时, 边坡的

放大效应才出现，反之，放大效应消失<sup>[11]</sup>。此外，坡面也使爆破震动波的强度和频率发生变化，与边坡稳定密切相关<sup>[15]</sup>。

坡高较大时各测点具体的振动速度是随传播距离增大而衰减，随边坡坡度、坡高增大而放大的综合结果，边坡的高差、坡比、地质状况及爆源能量的量级决定了这种特点。

公式 (5) 只适用于地势平坦坡高不大的情况，对于高差较大的部位，应考虑爆破地震波传播的高程效应，因此要将式 (5) 修正为如下形式：

$$v = K \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{r} \right)^\alpha \left( \frac{r}{s} \right)^\beta \quad (6)$$

$$\epsilon = \frac{r}{s} \quad (7)$$

式中： $s$  为爆心与测点之间的水平距离 (m)； $\beta$  为高程影响系数。分析时， $K$ ， $\alpha$ ， $\beta$  为回归系数。

式 (5) ~ (7) 耦合得式 (8)：

$$v = K \eta^\alpha \epsilon^\beta \quad (8)$$

为便于进行线性回归分析，对式 (8) 取自然对数得到式 (9)：

$$\lg v = \lg K + \alpha \lg \eta + \beta \lg \epsilon \quad (9)$$

将各测点的测试结果及条件参数整理见表 2。

表 2 测试结果及条件参数

Table 2 Ultrasonic velocity of damaged cylinder

测点号	$\lg \eta$	$\lg v$	$\lg \epsilon$	主频/Hz
1-1	-0.717 6	0.706 9	0.011 0	17
1-2	-0.922 3	-0.643 0	0.041 7	13.13
2-1	-1.275 4	-0.200 7	0.007 6	24.67
2-2	-1.219 9	-0.200 6	0.003 1	16.52
3-1	-0.926 2	0.481 3	0.044 3	22.26
3-2	-1.138 0	0.300 2	0.054 0	22.16
3-3	-1.235 9	-0.064 7	0.073 8	13.84
3-4	-1.280 0	0.005 0	0.081 7	15.28
3-5	-1.190 7	-0.588 6	0.064 2	14.84
4-1	-1.289 4	-1.193 6	0.055 3	37.24
4-2	-1.291 5	-0.368 6	0.038 1	56.88
4-3	-1.103 5	-0.110 7	0.018 5	15.75
4-4	-1.334 1	-0.497 2	0.060 0	13.65
5-1	-1.371 3	-0.789 1	0.036 4	13.65
5-2	-1.379 7	-0.637 8	0.034 9	16.00
5-3	-1.246 5	-0.336 1	0.094 0	15.17

通过 Matlab 软件编程进行多元线性回归计算得到式 (10)：

$$v = 72.15 \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{r} \right)^{1.655} \left( \frac{r}{s} \right)^{0.4102} \quad (10)$$

### 3.3 爆破震动特性分析

对测点 1-1, 2-1, 3-1, 4-1, 5-1 进行分析，将各测点距爆心的直线距离  $r$ ， $r$  与水平距离的比值  $r/s$  分别代入式 (10)，可以得出上述测点在相应地质条件和爆破方式条件下，垂直震动速度与同段起爆最大药量的关系 (见图 1)。

根据式 (7) 和 (10) 可以得出爆破震动的高程放大系数  $q$  与  $r$ ， $s$  的关系：

$$q = \left( \frac{r}{s} \right)^{0.4102} \quad (11)$$

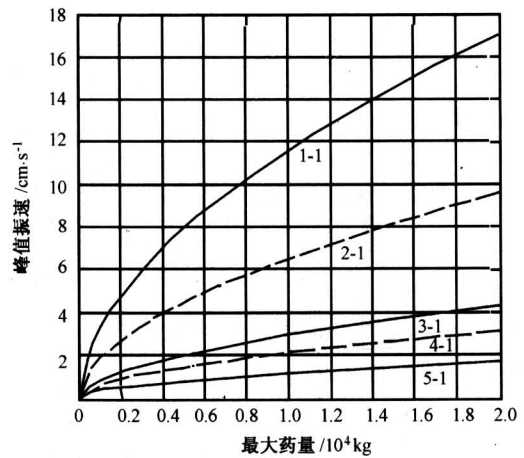


图 1 各测点峰值振速与最大药量的关系

Fig.1 Relationship between maximum vibration velocity and maximum explosive

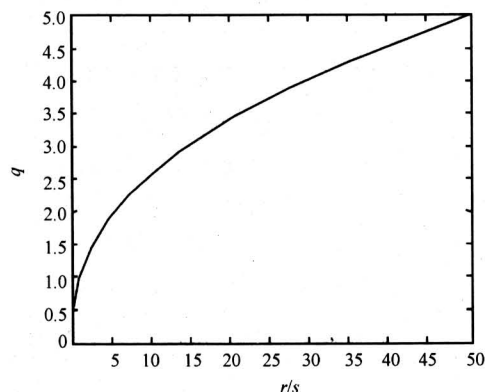


图 2 高程效应与 R/S 的关系

Fig.2 Relationship between height effect and R/S

图 2 反映了高程放大系数与  $r/s$  的关系。从图 3 可以看出，在  $r/s$  值较小时，随  $r/s$  值的增大，

振动速度放大系数上升较块,当  $r/s$  值较大时,振动速度放大系数上升趋缓,与文献 [15] 的结论一致,即爆破震动强度在一定范围内随着测点相对于爆心高程的增大而表现出加强的特性,放大效应与相对高程有关,在相对高程较小的情况下,放大效应明显,当相对高程超过一定值时,放大效应消失。图 3 反映了放大效应与相对高程变化率的关系。

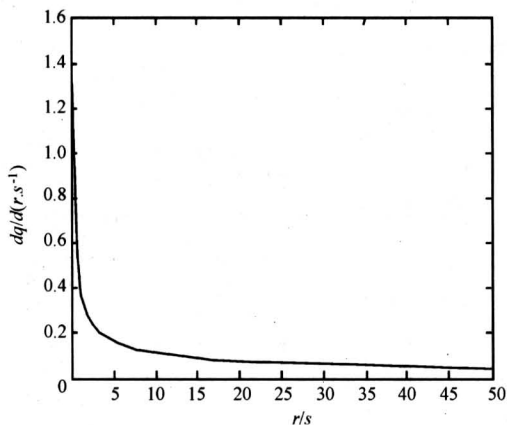


图 3 振速与相对高程变化率的关系

Fig.3 Relationship between vibration velocity and the change ratio of relative height

## 4 爆破减震措施

为降低或控制临近边坡生产爆破震动对边坡稳定性的影响,必须将爆破产生的震动控制在允许的范围。通常情况下,爆破减震的措施有:控制段起爆药量、预裂爆破、改变抵抗线方向、采用不耦合装药结构等方法。改变抵抗线方向的方法往往受地质、生产规模和工作面推进情况等条件的限制。在该露天矿开采中,除采用预裂爆破方法对边坡进行保护外,为保证一定的生产规模,重点采取了控制段最大起爆药量和时差干扰降震方法。

### 4.1 控制段起爆药量

公式 (10) 反映了该矿的爆破震动特性,该公式可变形为:

$$Q = 10.6 \times r^{2.2563} \times s^{0.7435} \times v^{1.8127} \quad (12)$$

根据式 (12),只要确定了边坡许可的最大安全震动速度  $v$ ,就可以根据式 (12) 确定在被保护边坡附近确定位置实施爆破时的同段起爆最大药量  $Q$ 。边坡能承受的爆破震动速度的确定须根据边坡的产状,地质构造分布,构造的产状,岩石的性质等因

素建立不同的模型进行分析确定,关于爆破震动许可速度确定将另文详细报道。

采场的分布范围很广,边坡情况变化大,因此在具体实施时,对现场进行划块分类管理,根据不同块段确定的安全震动速度  $v$ ,用式 (12) 确定每次起爆的同段最大起爆药量。

### 4.2 时差干扰降震法

为减小爆破震动对边坡的影响,要求控制同段起爆的最大药量;为保证一定的生产规模,往往要求加大一次起爆的药量,因此,保护边坡的稳定和维持一定的产量之间存在一定的矛盾,微差爆破技术是解决该类问题主要技术途径。在采用微差爆破的条件下,研究或测定点所受的爆破震动来源于每一段起爆所引起的震动。各段起爆引起震动波作用于同一测点存在一定的相位差,根据波的叠加理论,要实现各段起爆引起的不同相位的爆破震动波互相削弱,主要通过调节段与段之间的时差来控制。段与段之间的时间差主要体现在影响两列地震波的相位差,不同的相位差使得两列波叠加时,震动速度可能降低,实现干扰降震,也可能加强,导致降震失败或成功率低<sup>[16]</sup>。

理论上存在最佳段差时间  $\Delta t$ ,因为爆破对象的条件及地震波传播介质特性千差万别,所以目前尚无成熟、公认的理论确定最佳段差时间。最可靠的途径是针对具体的矿山条件和爆破条件进行试验,以确定最佳段差时间:根据试验矿的需要,通过使用能准确控制起爆时间间隔的 6 段位数字式起爆器在现场进行了 41 次试验,根据长沙矿冶研究院的研究成果,大部分矿岩的合理间隔时间在 8.4 ~ 12.7 ms 之间,为保证先起爆的炮孔为后起爆的炮孔提供良好的自由面,合理间隔时间应在 15 ms 及以上。因此分别测试了段差时间为 15, 25, 30, 35, 40 ms 的爆破震动情况。实验数据见表 3。

表 3 时差干扰降震试验数据

Table 3 Vibration reduction results of milliseconds delay experiments

段差 $\Delta t/ms$	平均降震率/%	降震成功率/%
15	23.6	76.7
25	-31.8	50.0
30	-34.3	50.0
35	15.1	73.1
40	34.6	78.6

平均降震率是指所有试验测点进行干扰降震试

验后, 测点的震动平均变化率。降震成功率是指测点中震动降低的测点百分率。从试验结果可知: 当段差时间为 15 ms 及 40 ms 时, 平均降震率和降震成功率都高; 段差为 25 ms 和 30 ms 时爆破震动加强; 为当段差时间为 15 ms 时, 平均降震率为 23.6%, 降震成功率为 76.7%。从延期雷管制作工艺角度考虑, 段数越高, 延期时间误差越大, 为保证一定的延时精度, 在能保证先起爆炮孔为后起爆炮孔提供自由面的前提下, 时差越小, 越有利于控制延期时间的误差。对该矿决定采用的最佳段差为 15 ms, 订制延期时间为 0, 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 135 ms 等段别的高精度导爆管毫秒雷管。使该矿场的爆破震动得到了有效的控制, 解决了生产和控制震动之间的矛盾。

## 5 结语

通过对某露天矿爆破震动测试, 回归分析得出了该矿考虑高程效应的爆破震动特性。结果表明: 爆破震动在一定范围内存在高程放大效应, 高程放大效应  $q$  与爆源到测点的距离和爆源与测点水平距离的比值  $r/s$  有关,  $q$  与  $r/s$  之间为非线性关系,  $r/s$  在一定程度上反映了爆破震动波及区域的地形, 本文的结果也证明了爆破震动响应与地形有关, 存在坡面效应现象。

根据爆破震动特性, 采用了综合的减震措施, 为了解决生产规模与控制爆破震动之间的矛盾, 采用了控制段起爆最大药量和时差干扰降震法。并给出了该矿段起爆最大药量的公式  $Q = 10.6 \times r^{2.256^3} \times s^{0.743^5} \times v^{1.812^7}$ ; 通过现场试验, 得出了该矿的最佳段差时间为 15 ms, 平均降震率达 23.6%。

### 参考文献

- [1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 中华人民共和国爆破安全规程[M]. 北京: 中国标准出版社. 2004. 42~44
- [2] 宋光明, 史秀志, 陈寿如. 露天矿边坡爆破振动破坏判据新方法及其应用[J]. 中南工业大学学报, 2000, 31(6): 485~488
- [3] Dowling C H, Gilbert C. Dynamic stability of rock slopes and high frequency traveling waves [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1988, 114(10): 1 069~1 088
- [4] 言志信, 吴德伦, 王 漪, 等. 地震效应及安全研究[J]. 岩土力学, 2002, 21(2): 201~203
- [5] 伍振志, 胡国详, 邓宗伟. 爆破地震安全判据若干问题探讨[J]. 安全与环境工程, 2003, 10(4): 64~66
- [6] Dowling C H. Monitoring and control of blasting effects [A]. Mining Engineering Handbook [M]. Prentice Hall, 1985. 66~89
- [7] 张永哲. 爆破地震波传播特性研究[J]. 爆破, 2000, 17(增): 6~10
- [8] 唐春海, 于亚伦, 王建国. 爆破地震安全判据的初步探讨[J]. 有色金属, 2001, 53(1): 1~4
- [9] 毛志远, 徐全军. 考虑频率影响的爆破震动安全判据的工程实践[J]. 工程爆破, 2001, 7(3): 19~22
- [10] 柴建设, 张云鹏, 甘德清. 棒磨山铁矿爆破震动对边坡稳定性影响的分析[J]. 有色矿山, 2000, 29(2): 12~14
- [11] 舒大强, 何蕴龙, 董振华. 岩质高边坡开挖爆破震动荷载及其对边坡稳定性影响的研究[J]. 工程爆破, 1996, 2(4): 39~43
- [12] 刘晓军, 邢德勇, 黄 宁, 等. 三峡右岸地下电站进水口高边坡开挖爆破震动安全监测[J]. 长江科学院院报, 2003, 20(增): 104~106
- [13] 马建军, 蔡路军, 叶洲元, 等. 高陡边坡爆破减震问题的探讨[J]. 有色金属(矿山部分), 2002, 54(2): 23~25
- [14] 舒大强, 赖世骥, 朱传云, 等. 岩石高边坡爆破震动效应观测及分析[J]. 爆破, 2000, 17(增): 245~248
- [15] 郭学彬. 爆破震动作用的坡面效应[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(1): 83~87
- [16] 陈寿如, 李雁翎, 谢圣权. 露天采场台阶干扰降震爆破技术试验研究[J]. 湖南科技大学学报, 2004, 19(2): 10~13.

## Characteristic and Shock Damping of Blast Vibration in a Certain Open Pit

Lin Daneng<sup>1, 2</sup>, Chen Shouru<sup>2</sup>, Liu Youping<sup>2</sup>

(1. College of Energy and Safety, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China

(2. School of Resources and Safety, Central South University, Changsha 410083 China)

(下转第 88 页)

## A New Explicit Equation for Calculating the Friction Factor for the Turbulent Flow in Pipes

Wang Yong, Ruan Qi

(Department of Chemical Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

**[Abstract]** The friction factor for the turbulent flow in pipes is the binary nonlinear function of Reynolds number and relative roughness. Calculating friction factor by implicit Colebrook equation have to use iterative algorithm, which is discommodious. The intelligent fitting method for binary nonlinear polynomials was presented in order to obtain a high precise and simple form explicit equation for calculating the friction factor. The binary nonlinear polynomial was firstly transformed into multivariate linear polynomials, and the least squares standard matrix was established. Then the number, the form, the index and the coefficient of polynomials term were searched to obtain the optimum function by genetic algorithms combined with matrix method. Fitting the data calculated by Colebrook equation with the above method, a new explicit equation for calculating the friction factor for the turbulent flow in pipes was obtained. The new equation can reproduce the Colebrook equation with average deviation of 0.5% and the maximum deviation of 1.8% in the range of Reynolds number being  $3\,000 \leq Re \leq 10^8$  and relative roughness being  $0 \leq e/d \leq 0.05$ , and it has an average deviation of 2.3% to the experimental data. The new equation has the advantages such as simple form, high precise, wide range of application, and can be simplified to the equation for calculating the friction factor in the range of smooth pipe and the rough region easily.

**[Key words]** turbulent flow; friction factor; implicit Colebrook equation; genetic algorithms; intelligent fitting method; explicit equation

---

(上接第 77 页)

**[Abstract]** To solve the problem of slope caused by blasting vibration damage at a certain iron mine, YBJ-1 blasting vibration seismometer and CD-1 velocity-meter were used to observe the velocity of particle caused by blasting according to the rock properties and the scale of blasting. The spreading law of blasting wave in the iron mine were acquired to propose an effective method of controlling the maximum blasting vibration velocity, which will keep slope close to blasting area safe from blasting vibration damage. The vibration velocity was proved to be relevant to explosive quantity and the location of testing spot. The magnifying effect of velocity along the height of slope was proved to decline with the relative height increasing. In terms of control of the maximum explosive quantity at the same time and the millisecond delay interval, blasting vibration has been reduced at the ratio of 23.6%. 15 ms delay interval was proved to be rational through the experiments in an open pit.

**[Key words]** open pit; blasting vibration; height effects, maximum explosive quantity at the same time; millisecond delay interval interference