第 17卷 第 3期
1997年 7月

爆 炸 与 冲 击
EXPLOSION AND SHOCK WAVES

Vol 17, No. 3
Jul., 1997

条形药包端部效应的研究

杨年华

(铁道部科学研究院 北京 100081)

摘要 通过一系列的模型试验和数值计算,得到了条形药包各部分峰值质点速度衰减规律,发现端部质点速度随着与轴线交角的减小而减小;端部作用范围随着距离的增加而向中部扩展。当药包长度小于 1.75W,不再表现出标准条形药包的作用特性。还根据端部质点速度衰减规律,探讨了端部增加药量来改善端部作用效果的计算公式。

关键词 条形药包 质点速度 端部效应

中图法分类号 TD235.1

1 前 言

目前对条形药包端部效应的认识还处于经验猜算阶段,只知道端部破岩和抛掷效果差,而对端部作用范围和端部作用强度缺乏足够的认识。为改善端部爆破效果,有人提出在端部增加药量,但增加多少药量,如何分配增加的药量,完全靠经验猜算,这就不可避免地会造成一些工程事故,如端部没能爆开或端部大块滚石太多等。所以工程实践中已迫切需要解决这一问题。下面我们从分析条形药包端部爆炸波质点速度场入手,以进一步从理论上探讨端部效应问题。

2 条形药包端部质点速度场的测试分析

从已有试验研究资料查询分析,目前对条形药包应力波场的研究大多限于中间的径向上,关于条形药包端部应力波的变化以及整体条形药包应力波场的特征尚无试验研究成果,而这正是认识条形药包端部效应的本质所在。

我们认为要认识条形药包爆破端部效应问题,关键的突破口是通过试验测量和理论计算来认识端部和中部应力波特征的差异,它既可为工程设计提供参考依据,也是推动条形药包爆破理论发展的基础。

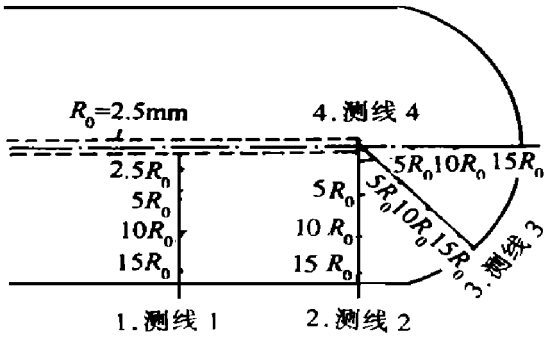
为了能可靠地测得条形药包质点速度场,我们设计了电滋法质点速度测试方案。试验介质为透明有机玻璃,电磁粒子速度计安装在有机玻璃内特征位置上。条形药包尺寸是 ϕ5mm× 100mm,炸药是黑索金,装药密度为 1200kg/m^3,起爆装置采用密点起爆法近似实现条形药包通条同时起爆,这样可使传感器安装和测试比较方便。为分别测得 5R_0、10R_0、15R_0距离点上的质点速度,测试样品每块分三种尺寸,在 4个特征方向的相同距离上布设测点。各样品尺寸的设计原则是:保证装药孔长径比 $D/d \geq 20$,传感元件至药包中心线距离分别为 5R_0、10R_0、15R_0,而传感元件到样品边界的距离 H 要足够大,以保证反射波传到传

* 1996-03-13收到原稿。

感元件位置之前, 所测位置点的冲击波已基本衰减完毕。质点速度量测点安排如图 1所示。

在电磁法测速试验中, 我们分别测试了图 1中 4条测线上 R/R_0= 2~ 15范围内的质点速度, 剔除异常数据后, 求得各测点上的平均值列于表 1。

从表 1看出尽管模型试验测量点非常有限, 但基本反映出 1线方向质点速度最大, 2线方向次之, 端部 45°方向和端轴线方向质点速度明显小于径向质点速度。当然如此少量数据点还不足以完整地反应条形药包端部峰值质点速度场和中部质点速度场的差别。为此我们以相同于模型试验的条件, 又用 EPIC2程序作了数值模拟计算。



1 M easuring line 1; 2 M easuring line 2; 3 M easuring line 3; 4 M easuring line 4

图 1　测线和测点在试样中的位置

Fig. 1　Location of measuring lines and points

表 1　测点峰值质点速度试验数据表

Table 1　The test data of peak particle velocity at measuring points

测线号	R/R_0	v/(m/s)	R/R_0	v/(m/s)	R/R_0	v/(m/s)	R/R_0	v/(m/s)	R/R_0	v/(m/s)
1	2.04	447.4	2.87	348.6	5.76	217.4	9.91	132.9	15.3	85.0
2					4.9	136.9	9.91	73.2	14.9	51.41
3							10.0	51.86	14.95	32.60
4					4.9	118.5	10.36	43.09	15.0	31.10

3　条形药包质点速度场数值模拟计算

EPIC2程序可以模拟高速碰撞及各种爆炸问题的动力分析, 适用于轴对称和平面应变问题。此程序建立在拉氏有限元的基础上, 对弹塑性流和波的传播, 程序考虑了非线性材料强度和可压缩性。计算中把无限介质中条形药包处理成轴对称的旋转体, 然后当作二维问题求解。计算中有机玻璃材料用 Mie-Grüneisen 状态方程来描述, 方程中的参数 K_1、K_2、K_3, 通过查找资料取值为 K_1= 7.839 × 10^9; K_2= 1.6242× 10^{10}; K_3= 1.5159× 10^{10}, 最终计算得到爆后等峰值质点速度分布见图 2。

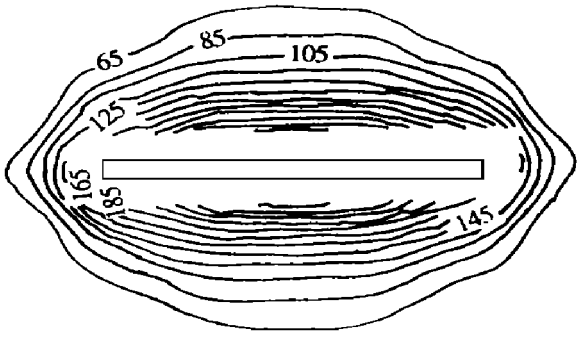


图 2　条形药包在无限有机玻璃介质中峰值质点速度场

Fig. 2　The field of peak particle velocity by explosion of a linear charge in infinite plexiglass

从该分布图上可找出模型试验中 4条测线上质点速度衰减规律, 将这 4个特征方向上质点速度的计算值和试验实测值对比, 见图 3。从图 3看出, 计算值与试验值基本吻合, 由此

可以相信 EPIC2的数值模拟计算是正确的、可靠的,完全适合于条形药包在无限介质中爆炸速度的计算。

既然 EPIC2程序能对有机玻璃介质中条形药包爆炸质点速度场得到满意的计算结果,那么同样可计算出无限花岗岩介质中条形药包的质点速度场。根据查询资料,我们取花岗岩的物理力学参数为 $\rho_0 = 2600\,\mathrm{kg/cm^3}$,剪切模量 $G = 8.96\,\mathrm{GPa}$,声速为 4.5km/s,Mie-Grüneisen状态方程的参数:$K_1 = 0.523575\times10^{11}$;$K_2 = 1.20362\times10^{11}$;$K_3 = 1.30518\times10^{11}$。最终由 EPIC2程序计算得到的无限花岗岩介质中条形药包爆后峰值质点速度分布场如图 4,花岗岩介质中条形药包的 4个特征方向上峰值质点速度衰减规律如图 5。

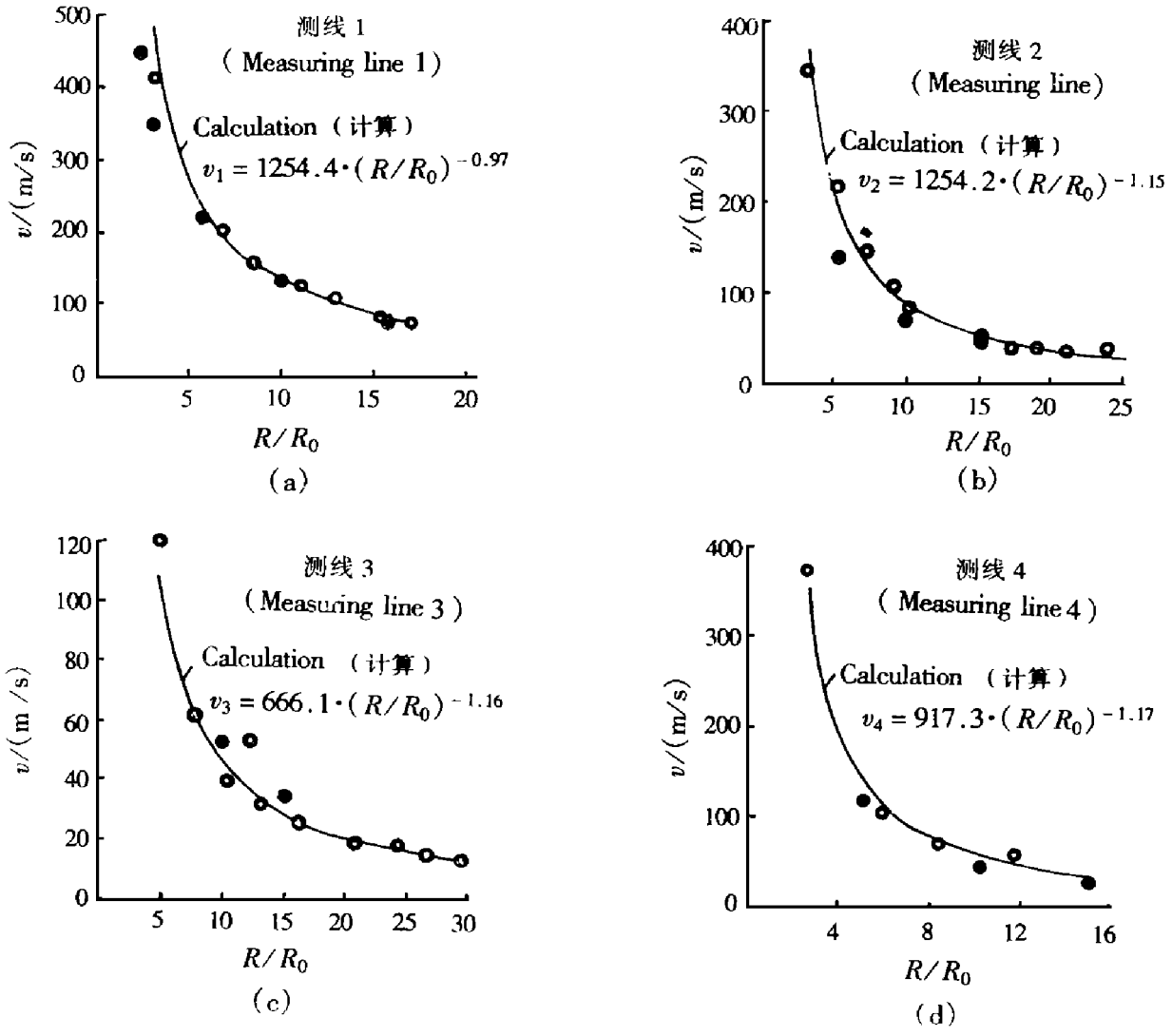


图 3 质点速度随比例距离的衰减曲线

· 表示实测点 ° 表示数值计算点

Fig. 3 Particle velocity attenuation curves versus scaled distances

· Indicating the actually measuring points

° Indicating the numerical simulating points

4　条形药包端部质点速度场分布特征

根据试验和计算结果可知,无论有机玻璃还是花岗岩,中端部各方向上峰值质点速度明显小于中间径向峰值质点速度,由图 4和图 5看来,随着与轴线夹角 T的减小,端部质点速度不断减小。端头径向峰值质点速度只有中心径向峰值质点速度的 0 75倍,而端头 45°和 0°方向的峰值质点速度只有端头径向峰值质点速度的 0 5倍左右。另外 90°方向衰减指数为 0 675, 45°方向衰减指数为 0 82, 0°方向衰减指数为 0 91,说明衰减指数随着 T角的减小不断增加。尽管各方向的衰减指数与介质特性有关,但这些衰减指数随 T角变化规律是相同的,即 T角越小,衰减指数越大。

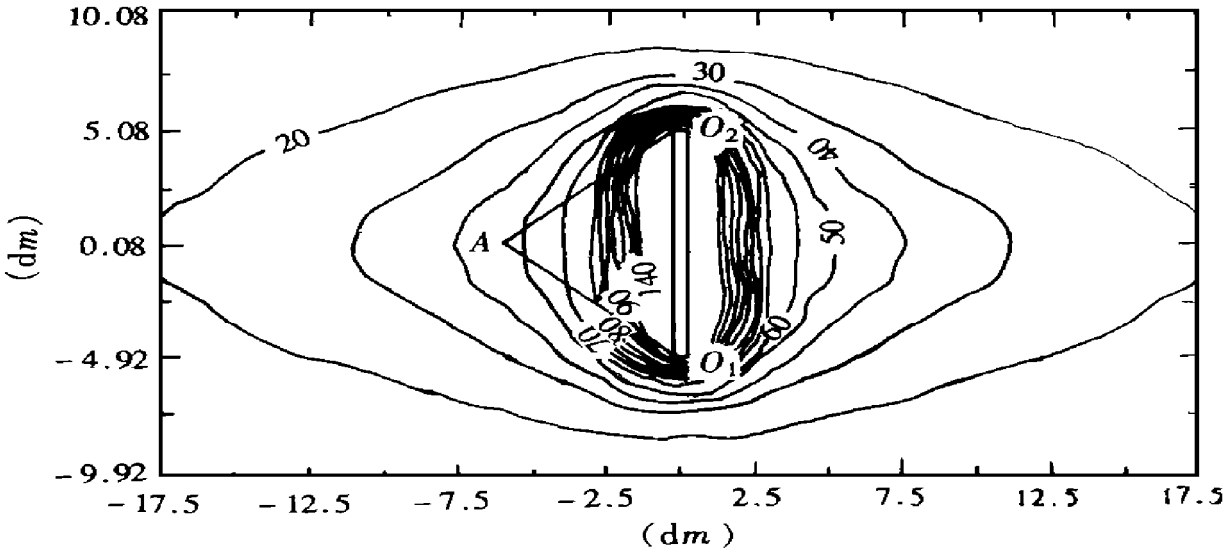


图 4　条形药包在无限花岗岩介质中峰值质点速度场

Fig. 4　The field of peak particle velocity by explosion of a linear charge in infinit granite

另外图 4表明峰值质点速度等值线在中部为圆柱形分布,到端部一定范围等值线就开始弯曲,端部等值线接近椭圆形。随着到爆源距离的增加,端部峰值质点速度等值线椭圆形分布范围不断增大。端部椭圆形等值线范围随距离增加而扩大的关系见图 4中的两条界线。从药包两端 O_1, O_2分别引出的 50°线交于 A 点, A 点到药包轴心的距离为 0 57L, ΔO_1O_2A 范围内的等值线是平值段,表明此范围内峰值质点速度基本为柱形分布;而 ΔO_1O_2A 范围以外等值线接近半椭圆

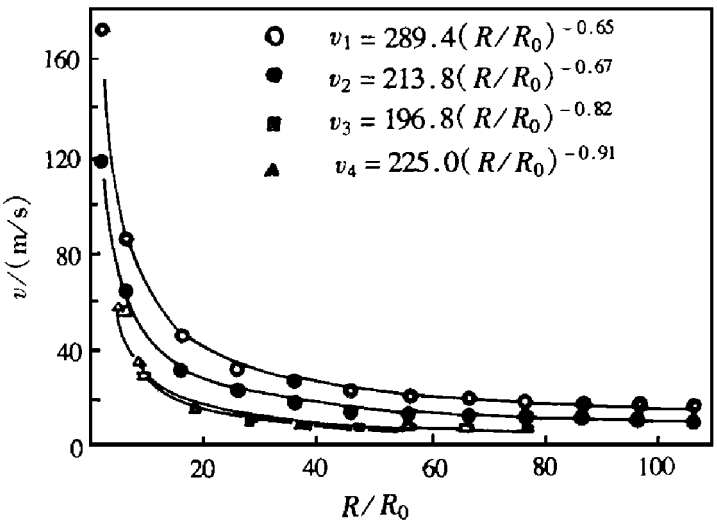


图 5　四个特征方向上质点速度衰减曲线

Fig. 5　Peak particle velocity attenuation curves in four characteristic directions

形, 说明 ΔO_1O_2A 以外是条形药包的端部作用范围。当然此端部范围扩展角不会在任何情况下都是 50°, 它与介质特性和药包长径比非常有关。可以相信对于大多数岩石介质长径比大于 20的条形药包, 其端部作用范围应以 45°角以上的夹角向外扩展。

5 端部药量调整计算

根据实践和计算结果可知, 花岗岩中条形药包端部质点速度比中部质点速度明显减小, 实践经验也证明端部岩石破碎和抛掷效果都较中间差, 要想使端部岩石的破碎和抛掷同中间段相当, 通常采用端头增加药量的办法, 但增加多少药量才合理呢? 下面将根据质点速度衰减规律加以探讨。

从图 4和图 5可知, 端部测线 2方向的质点速度衰减明显快于中心测线 1方向, 若测线 1和测线 2方向的最小抵抗线相等, 见图 6, 则根据各测线方向质点速度衰减规律, 自由面上 A 点的质点速度将明显小于 B 点质点速度。要使 A 点和 B 点的破碎和抛掷效果相当, 应考虑 A 点的质点速度等于 B 点的质点速度。根据图 5可知

$$v_A = 213.8(W/R_{0A})^{-0.67} \tag{1}$$

$$v_B = 289.4(W/R_{0B})^{-0.65} \tag{2}$$

R_{0A}, R_{0B}分别表示端头和中间的条形药包装药半径 (m); v_A, v_B 分别表示端头 A 点和中间 B 的质点速度 (m/s)。

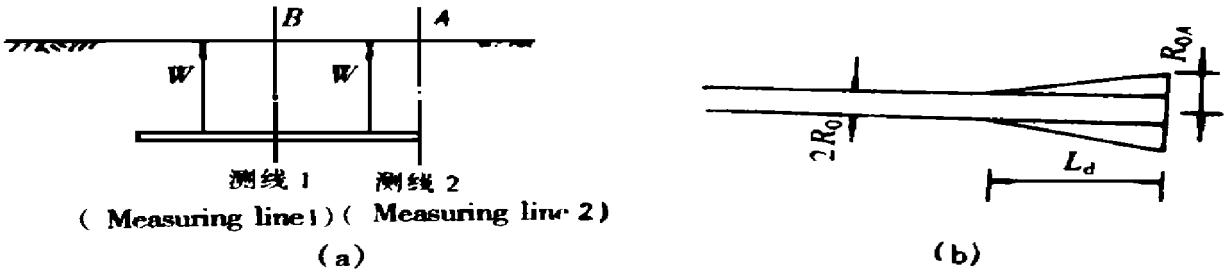


图 6 条形药包端部药量调整计算示意图

Fig. 6 The scheme for calculating the weight of charge added at the end of a linear charge

要使 $v_A = v_B$, 只有加大端头的装药半径 R_{0A}, 于是由式 (1) 和式 (2)可推求出端头装药半径 $R_{0A} = 1.22R_0$。

所以端头最大装药半径可比原条形药包装药半径大 1.22倍。再根据上述分析端部质点速度分布场以 49°角向外扩展, 则可假设端部加药长度 $l_a = W \cdot \cot 49° = 0.87W$, 由此推论条形药包装药长度至少应大于 $2l_a = 1.75W$ 才能表现出标准条形药包的作用特性。

若假定端部装药半径的变化近似为线性减小, 则端部应增加的总药量为

$$Q_a = \pi l_a d_e (R_0^2 + R_{0A}^2 + R_0R_{0A})/3 - \pi l_a d_e R_0^2 = 0.65W d_e R_0^2$$

以上对端头增加药量的探讨没有考虑不耦合装药系数的影响, 当不耦合系数过大时, 端部加药的作用需另当别论。

6 结　语

本文通过模型实验和数值模拟计算,对条形药包端部效应得到以下几点认识:

(1) 条形药包端部峰值质点速度明显小于中部峰值质点速度,端部的峰值质点速度随着与轴线交角 T的减小而减小,且各方向的衰减指数随 T角的减小而增大。

(2) 条形药包中部峰值质点速度等值线呈圆柱形分布,端部等值线接近椭圆形。端部作用范围约以 49°角的斜线为界向中部扩展,由此还推论标准条形药包长度至少应大于 1.75W,才能表现出标准条形药包的作用特性。

(3) 条形药包端头加药范围可在 0.87W 的药包长度内,端点最大装药半径可取 1.22R_0,实际端部加药受空腔内气体压力的流动和再平衡影响,作用效果相当复杂。

本文中某些观点是通过冯叔瑜先生的指点后获得的,作者在此表示感谢冯叔瑜先生。

参　考　文　献

1　亨利奇 J著,熊建国译. 爆炸动力学及其应用. 北京: 科学出版社, 1987

2　杨年华. 条形药包爆破作用机理: [博士论文]. 北京: 铁道部科学研究院, 1994

THE BLASTING EFFECT AT THE END OF A LINEAR CHARGE

Yang Nianhua

(*Chian Academy of Railway Science, Beijing*, 100081)

ABSTRACT　The decline laws of the peak particle velocity at diffrernt parts of a linear charge are obtained by a series of model tests and digital modeling calculations. It is discovered that the peak particle velocity at the end decreases slowly with the angle T. The angle T is the angle of the axis with the linear charge.

The longer the distance to the axis of a linear charge is, the larger the end action range. When the length of a linear charge is shorter than 1.75 times of the burden, it does not character as a standard linear charge. A calculation formula for adding explosive weight at the ends of a linear charge is proposed on the basis of these decline laws in this paper. Adding explosive weight at the ends may improve the blasting effect.

KEYWORDS　linear charge; particle velocity; effect of the end part