

硐室爆破空腔比的动光弹研究与工程应用

龚敏 陈向东

北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083

摘要 为了分析不同空腔条形药包爆破效果,以动光弹为研究手段,用五种不同空腔比实验模型进行了爆破动应力场及破坏结果研究,并在首钢128t硐室大爆破中进行了工程应用.研究和应用结果表明:最佳空腔比约为4.0;在岩石特别破碎地区为控制飞石,可采用大空腔比进行爆破设计理论.

关键词 硐室爆破;空腔比;爆破效果;条形药包;全息动光弹

分类号 TD253.1

硐室爆破目前大量采用了条形药包的装药形式.而在条形药包爆破中,一般认为空腔条形药包效果较好,它能有效地降低药室孔壁的初期不必要的高应力,延长后期爆生气体的作用,从而明显改善爆破效果.过去许多学者对此进行了理论和工程应用研究,Borovikov V A^[1]应用弹塑性力学基本方程,对岩石中延长药包空腔发展过程进行计算;陶纪南^[2]等人利用球药包叠加求和方法,分析了在岩石和黄土中条形药包爆炸下偶合系数对爆破作用和应力波参数的影响;卢文波^[3]、李端明^[4]分别计算论证了任一单元球药包的空腔发展过程和条形药包的最优空腔比.但条形药包本身及空腔这种特殊的装药结构使其对介质的作用极其复杂,有待深入研究.

利用高速自动分幅激光全息动光弹,一次爆破加载可记录四个不同时刻的爆破等差条纹图,在解决了爆炸过程和照相同步控制、空腔条形模型等量装药等实验技术的基础上,本文对不同空腔比时条形药包应力场及爆后效果进行了分析,并将实验研究结果应用于首钢128t硐室松动大爆破中,总结出实际工程爆破较适宜的空腔比.

1 实验模型

条形药包实验模型中一个很大的问题是由于模型大小的限制,线型爆炸源的精确装药十分困难.过去是在模型开槽后直接将炸药撒在槽

中,线装药密度实际上是不均匀和很难控制的;而且这样为耦合装药,不可能模拟不同空腔比药包.在研究中采用特制的小管,精确控制装药量,不仅保证了线装药密度均匀,并使不同空腔条形药包实验成为可能.

模型实验采用环氧树脂板,尺寸为250 mm×250 mm×5 mm.每次实验时药室长度5 cm,装药长度4.1 cm,爆炸加载源为PbN6 140 mg,线装药密度34.15 mg·cm⁻¹,实验时为模拟导爆索起爆,采用了通体同时起爆.

共进行了五组单个条形药包实验,空腔比分别为耦合装药,2.1,3.0,4.0,7.0.记录时刻为起爆后15,30,42,60 μs,同步误差不超过3 μs.

2 实验结果和数据分析

图1是实验所获得的五组不同空腔比爆炸时的全息动光弹实验照片(本文仅列出空腔比为4的一组).根据条形图及Durelli^[5]提出的动态条纹判据,确定四个时刻的条纹级次,计算沿药包纵向中垂线上条纹级次值,同时作出相应的变化曲线.由于条纹级次与最大剪应力是线性相关的,因此动光弹研究中通常用条纹级数的变化来衡量应力场的变化,如图2所示.

2.1 $t_1=15\mu\text{s}$ 时的条纹图分析

由条纹图可知,五组实验在这一时刻的应力场主要表现为膨胀波迭加后的综合效果,波阵面形状呈椭圆形.两端部条纹稀疏,应力场较弱,P波最大条纹级数均出现在条形药包柱部中垂线上,后续波(指包含S波和沿药柱迭加而成的波)

收稿日期:2005-06-10 修回日期:2005-10-08

基金项目:国家自然科学基金资助课题(No.19802002)

作者简介:龚敏(1963—),男,副教授,博士

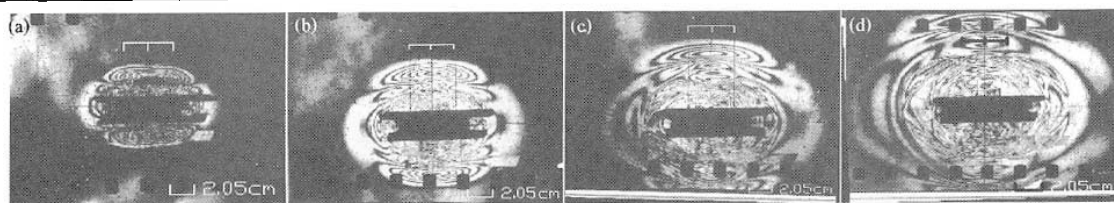


图1 空腔比为4.0时条形药包爆破实验等差条纹图。(a) $t_1=15\mu\text{s}$; (b) $t_2=30\mu\text{s}$; (c) $t_3=42\mu\text{s}$; (d) $t_4=60\mu\text{s}$

Fig.1 Isochromatic fringe patterns of linear charge detonation at a cavity ratio of 4.0: (a) $t_1=15\mu\text{s}$; (b) $t_2=30\mu\text{s}$; (c) $t_3=42\mu\text{s}$; (d) $t_4=60\mu\text{s}$

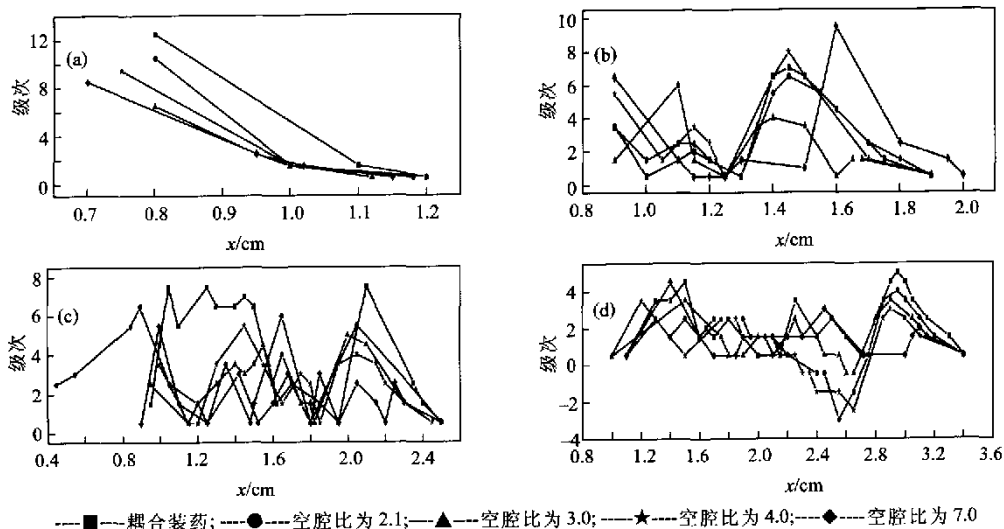


图2 不同空腔比下中垂线上条纹级次分布图。(a) $t_1=15\mu\text{s}$; (b) $t_2=30\mu\text{s}$; (c) $t_3=42\mu\text{s}$; (d) $t_4=60\mu\text{s}$

Fig.2 Distribution of fringe order in the perpendicular bisector at different cavity ratios at (a) $t_1=15\mu\text{s}$; (b) $t_2=30\mu\text{s}$; (c) $t_3=42\mu\text{s}$; (d) $t_4=60\mu\text{s}$

已经出现, 占整个应力场一半左右的区间, 但强度还较弱。图2(a)为迭加后的膨胀波在中垂线的分布。具体地说, 随着空腔比逐渐增大, 五组实验的最大条纹级数为12.5, 10.5, 9.5, 8.5, 6.5, 端部最大条纹级数为1.5级, 其余均为0.5级。因此, 空腔比不同, 应力场分布形式基本没有差异, 但强度不同。

2.2 $t_2=30\mu\text{s}$ 时的空腔效应

从波阵面看, 端部速度较慢, 而柱部传播速度较快, 初始膨胀波迭加形式的应力场发生了衰减, 条带状后续波的应力强度较上一时刻明显增加, 它与波阵面为椭圆形的膨胀波不同, 最大条纹级数不是在中垂线上, 而是位于柱部两侧, 与条形药包轴线的中点呈 45° 的方位, 其强度表现出不平衡性。随着空腔比增大, 最大P波条纹级数位于中垂线上, 分别为10.0, 8.0, 7.0, 6.5, 6.0; 后续波最大级数为12.0, 11.5, 8.5, 7.0, 6.0。它表明随着P波的衰减, 后续波强度正在上升, 使爆破近区受到较大应力的作用。而且随着空腔比的增加, 不同条形药包对近区的应力场强度降低, 而在远区(P波作用区如中垂线上), 下降趋势有所减弱, 如空腔比为2.1和3.0的模型最大级数均为

7.0。图2(b)是模型在中垂线上波合成后的条纹级次分布规律。比起耦合装药, 空腔比为2~4的中垂线最大应力差别不是非常明显, 空腔比为7的条纹级次相对较小。

2.3 $t_3=42\mu\text{s}$ 时的模型实验分析

根据这一时刻和五组条纹图分析, 初始迭加的P波表现出明显的衰减, 在应力波传播中, 端部和柱部应力波阵面由于传播速度的不同, 短轴长度从 t_1 时和长轴有较大差异, 至 t_3 时基本接近长轴。经过计算发现, $t=15\mu\text{s}$ 以前端部速度只有柱部波阵面速度的70%, 之后柱部速度减慢, 端部有所增加。这一现象与集中药包应力波传播有很大不同, 它与线性载荷和通体起爆造成波的迭加有关。柱部中垂线上P波在本时刻内部迭加高峰已过; 后续波在 $30\mu\text{s}$ 之前递增, 到 $42\mu\text{s}$ 时发生衰减。随着空腔比从小变大, 膨胀波最大条纹级次依次为7.5, 6.5, 5.0, 5.5, 6.0级。图2(c)是中垂线上P波、后续波条纹级次分布图。由图可知, 一般地, 在空腔比较小时最大剪应力较前一时平均下降幅度在25%左右, 与起爆后 $15\mu\text{s}$ 时相比, 大部分下降40%~50%。但空腔比越大, 这种下降趋势越缓, 甚至当空腔比为7时最大条纹级数和上

一时刻的级数持平, 这证明在空腔的作用下, 贮存的爆生气体在爆破后期对介质的影响已经开始显现, 不同空腔比模型的最大条纹级数差别已渐趋相同。

2.4 $t_4=60\mu\text{s}$ 时的条纹图分析

不同空腔比的五组实验中, 共同特点是应力波传播后波阵面与集中药包的同心圆类似, 但各方向的应力场强度与集中药包有本质的区别。两端部应力场强度较低, 柱部较高, 并以中垂线方向最强, 后续波在中部两侧约 45° 方向迭加的强度较大。P波与后续波波阵面进一步拉开, 中间形成一定的低应力区。在 $t=60\mu\text{s}$ 时, 除耦合装药外, 各实验组膨胀波最高应力波条纹级数的差别不大。图 2(d) 是中垂线上两种波的条纹级数分布图。空腔比逐步增加, 5 组实验 P 波最高条纹级数分别为 5.0, 4.0, 3.5, 3.5, 4.5 级。注意此时各组实验中均有拉伸区出现。迭加合成的条带状应力区最高条纹级数分别为 4.0, 3.5, 4.5, 3.5, 3.5 级, 基本趋于一致。因此可以认为, 在爆破作用后期, 不同空腔比爆破应力场的强度差别不大。

图 3 是不同空腔比下最大条纹级次随时间变化规律。在起爆 $42\mu\text{s}$ 之前, 不同空腔比所产生的最大应力相差很大, 从上面分析可知, 这时无论是中垂线上的 P 波还是它两侧的后续波均已过每一模型动态过程的最大应力峰值。而在 $42\mu\text{s}$ 以后空腔比为 7 的甚至出现应力条纹值比空腔比小的增大的现象。

2.5 爆破后模型破坏效果

本研究中以装药直径的 3 倍为界, 将爆破区域分为爆破近区和爆破远区。耦合装药模型爆后近区出现飞散, 形成一大空洞。空腔比为 2.1 的模型周围亦有空洞, 远区裂纹较发育; 空腔比为 3.0,

4.0 的模型爆后未出现飞散现象, 爆破近区裂纹较多, 远区裂纹较空腔比为 2.1 的多 3~4 根; 空腔比为 7.0 的药包近区裂纹较上述几组明显减少, 远区较空腔比为 4.0 的少 1 条裂纹。

3 综合分析

(1) 在通体起爆条件下, 条形药包不同空腔比所产生的应力场初始时刻均以柱面波形状向外传播, 波阵面为椭圆形。随着时间的推移, 端部和柱部应力波传播速度发生了变化, 致使波阵面和集中药包类似, 但强度分布不均衡。除了柱部应力场较集中药包高外, 在端部, 不同空腔比、不同时间均呈现出端部应力场很低的现象, 与集中药包应力场有质的区别。

(2) 就单个条形药包应力波传播进行分析, 应力波迭加最大值有两个区域: 一个是中垂线方向; 另一个是在中垂线两侧 45° 方向。但它们形成的原因和形成时间是不相同的: 前者是由膨胀波迭加而成, 形成于起爆后很短的时间 (本实验形成于起爆后 $15\mu\text{s}$), 后者是由剪切波迭加而成, 形成最大应力波强度要比中垂线上的晚, 这两个区域应力波的扩展形成了柱部较为均匀的应力场, 从而说明了柱部是长形药包应力场的主要作用方向。

(3) 条形药包起爆后在较短时间就达应力波迭加峰值。根据动光弹模型实验, 小型实验药卷应力波传播时间在 $120\mu\text{s}$ 左右^[6], 则最多在应力波传播过程的最初 $1/4$ 以前已达最大应力, 在中垂线上的应力峰值点短于整个时间的 $1/8$, 因此应力峰值作用时间非常短暂, 对介质的破坏作用很大程度上依赖于后期的爆生气体作用。

(4) 在工程实践上, 目前注重的是不同空腔比对大爆破效果的影响。从本文研究来看, 以耦合装药药包作为标准, 在起爆后 $30\mu\text{s}$ 以前, 空腔比为 2.1 时每一动态时刻最大条纹值与耦合装药相应时刻相差在 20% 以内, 空腔比为 3.0 和 4.0 时与耦合装药的相应条纹值小 30% 左右; 但在爆破作用的大部分时间 ($t=42\mu\text{s}$ 以后), 不同空腔比的最大应力强度在爆破远区的差别已经不大, 且均维持了一定的强度。在空腔比为 7.0 时应力波作用的后期最大应力条纹值还有一定增长, 这说明爆生气体的影响在时间较长时是有作用的。从模型爆后效果和爆破条纹图综合考虑, 最佳空腔比约为 4.0 及以上较为合适, 爆破近区、远区爆破效果

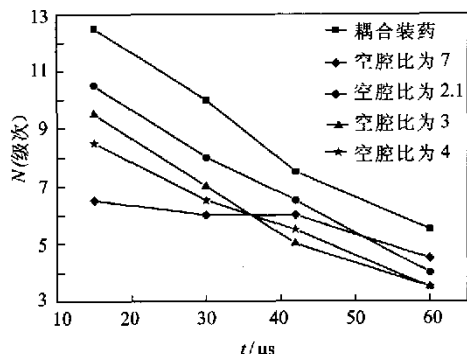


图 3 不同空腔比下最大条纹级次随时间变化

Fig.3 Change of the largest fringe order according to time under different cavity ratio

及动应力场的作用均达到较为适宜的情况。

(5)根据工程爆破的一般看法,条形药包的空腔比一般不宜大于 6.0,但从本文的研究可以发现,在空腔比为 7.0 的情况下条形药包在爆破的初期较耦合装药小 48%,但在 $t_3 \sim t_4$ 时应力场较其他空腔比差别不明显,各种空腔比应力场在爆破后期趋于一致。对于较为破碎地段的岩石而言,在其他条件不变的情况下,爆破初期的大应力峰值往往导致其冲孔和飞石,因此采用空腔比在 7.0 左右在此情况下应具有良好的效果。

4 工程应用

首钢矿业公司于 2003 年 9 月在孟家沟采区对 385 m 水平以上, S500~S600 勘探线之间的部分山体进行一次硐室松动。本次大爆破总装药量为 129 t, 分四段起爆, 最大一段起爆药量为 24 t^[7]。

根据岩石条件, 本次大爆破原设计的药室中空腔比控制在 3.8~6.0 不等。但在 8 月初施工以后直至 9 月 3 日, 种种原因导致爆区西部、南部不断出现岩体塌方情况, 最严重的三次将正在施工的 102 峒子全部埋住, 一次塌方量最大达 10⁵ m³。直接影响到 1011 和 1022 药室。鉴于岩石较为破碎、药室已经开挖, 在最后设计时将受塌方影响的上述两药室降低药量, 实际空腔比分别取为 8.5 和 9.0, 其他药室的空腔比保持不变。

爆破于 2003 年 9 月 16 日实施, 不同药室采用的不同空腔比爆破效果十分理想, 岩石破碎均匀(如图 4 是爆后效果图), 飞石距离控制在 150 m 之内, 对周围民房及工业建、构筑物没有造成不良影响。



图 4 大爆破后效果

Fig.4 Effect after the chamber blasting

5 结论

(1) 条形药包爆破的应力场和其他装药方式(如集中载荷)从强度和形成上有较大差别, 柱部是其爆破作用的主要区域。

(2) 通过不同空腔比实验研究的结果进行工程实践的运用, 证实了最佳空腔比的存在。

(3) 大空腔比在特定条件下(尤其是在岩石破碎区域)具有良好的爆破效果, 这有助于改变以往对大空腔比某些不正确的认识。

参 考 文 献

- [1] Borovikov V A. Development of a gas cavity when a cylindrical charge is exploded in rock. *Soviet Min Sci*, 1980, 16(6): 539
- [2] 陶纪南. 条形空腔药包破坏范围和抛掷规律的研究. *爆炸与冲击*, 1990, 10(2): 340
- [3] 卢文波, 朱传云, 赖世骥, 等. 条形药包的空腔发展过程模拟. *爆炸与冲击*, 1996, 16(2): 171
- [4] 李端明, 唐中华, 张志呈. 条形药包爆破的最优空腔比. *四川冶金*, 1988, 4: 4
- [5] Durelli A J, Shukla A. Identification of isochromatic fringes. *Exp Mech*, 1983, 23(1): 111
- [6] 龚敏, 于亚伦. 预裂-缓冲爆破中柱状空间应力波作用分析. *北京科技大学学报*, 1998, 20(1): 159
- [7] 龚敏, 王德胜. 首钢孟家沟第二次大爆破设计说明书. 北京科大方正爆破工程有限公司, 2003

Dynamic photoelastic research and engineering application of chamber blasting at different cavity ratios

GONG Min, CHEN Xiangdong

Civil and Environmental Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

ABSTRACT In order to analyze the blasting effect of linear charge at different cavity ratios, the changes of stress field and the destroyed effect at five cavity ratios were investigated by dynamic photoelasticity in experimental models. These were applied to 128 t chamber blasting in Shougang Mine in China. The results indicated that the cavity ratio above 4.0 was suitable. And a bigger cavity ratio in a broken stone area was designed for controlling fly rock.

KEY WORDS chamber blasting; cavity ratio; blasting effect; linear charge; dynamic photoelasticity