

文章编号: 1001-1455(2004)05-0437-06

# 基于 Starfield 迭加法的条形药包爆炸应力场分析<sup>\*</sup>

向文飞, 舒大强, 朱传兵

(武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要: 在分析条形药包的现有理论研究方法与实验成果的基础上, 认为爆轰波沿装药方向传播的时间效应是影响条形药包爆炸应力场特征的主要因素。综合 Starfield 迭加法与动力有限元法, 提出了基于 Starfield 迭加原理的条形药包爆炸应力场数值分析模型, 全面分析了不同起爆方式下条形药包爆炸应力场发展及形成规律, 结论对实际工程具有一定指导意义。

关键词: 爆炸力学; 爆炸应力场; Starfield 迭加法; 条形药包

中图分类号: O389; TD235

国标学科代码: 130°3520

文献标志码: A

## 1 引言

近几十年条形药包在爆破工程中得到广泛应用, 但是关于条形药包爆破作用机理的研究刚起步, 理论研究远落后于爆破实践, 妨碍了条形药包爆破技术的发展。因此, 对条形药包爆破作用机理及相关理论进行全面深入的研究, 建立关于条形药包爆破完善的理论体系, 对指导条形药包爆破实践有重要意义。大量工程经验表明, 条形药包在岩石中爆炸激发的应力场特征是影响爆破效果的主要因素, 因此, 爆炸应力场分析是研究条形药包爆破机理的一个基本问题。本文中在总结比较现有条形药包爆炸应力场分析方法与研究成果的基础上, 提出了基于 A. M. Starfield 迭加法的条形药包爆炸应力场数值分析法, 分析了影响条形装药爆炸应力场特征的主要因素, 对实际工程有一定的指导作用。

## 2 条形药包爆炸应力场研究现状

目前, 国内外关于条形药包爆炸应力场的研究主要集中在条形装药激发应力场的理论计算和模拟实验两个方面。

在条形装药激发应力场的理论计算方面主要形成了四类方法: 柱面波理论<sup>[1]</sup>、等效单元球药包迭加法和模型<sup>[2]</sup>、理想流体介质模型<sup>[3]</sup>、动力有限元方法。柱面波理论适合描述条形药包在瞬时爆轰情况下激发的应力场, 但是不能考虑爆轰波沿装药轴线方向的传播, 所以在实际条形药包爆破中, 用柱面波理论描述应力波的发展传播规律与实际有较大出入。为此, A. M. Starfield 提出了等效单元球药包迭加法, 把条形装药的爆破作用分解为有限多个具有等效半径的单元球状药包的迭加, 然后利用等效球药包的应力波参数来获得一定爆轰波传播速度下整个条形装药激发的应力波参数。之后, 卢文波<sup>[4]</sup>对等效单元球药包的应力波参数进行了进一步研究。但 Starfield 迭加法没有考虑岩石介质在冲击荷载下复杂的本构关系。原苏联 I. B. Neiman 提出条形药包应力波参数计算的理想流体介质模型<sup>[3]</sup>, 把岩石介质在冲击荷载作用下假想为不可压缩的理想流体, 爆炸作用后介质中存在的质点速度场的势函数满足 Laplace 方程。这个计算模型数学推理严密, 但对介质的初始假设很苛刻, 适用范围非常有限。由于有限元法能够灵活地处理各种复杂的边界条件、不同的加载过程以及各种应力应变关系, 一些相对成熟的动力有限元软件相继开发成功, 故用动力有限元方法计算条形药包的应力波参数也是一种重要的手段。

在理论研究发展的同时, 国内外也有许多学者通过模拟实验来探索条形药包的爆破作用规律。国

\* 收稿日期: 2003-11-18; 修回日期: 2004-03-03

作者简介: 向文飞(1977—), 男, 博士研究生。

外的实验研究开始于20世纪七、八十年代,文献[5]总结了其中比较有代表性的研究成果。在我国,最近十年来也有大量的研究人员从事条形药包模拟实验方面的工作<sup>[6~9]</sup>,这些实验一般以有机玻璃、聚碳酸酯等材料为介质,采用动光弹、高速摄影等技术,研究条形装药在介质中爆炸激发的应力场、位移场或速度场的变化规律,从而在一定程度上揭示条形药包爆破破岩规律。在这些实验中,介质中的条形药包大多是采用多根导爆索密点起爆近似模拟同时起爆,观察结果只能是条形药包在近似瞬时爆轰条件下介质中应力场的变化规律,不能反映起爆点这一关键因素对条形药包爆炸应力场的影响。个别学者开展了起爆位置对条形药包爆炸应力场影响的实验<sup>[10~11]</sup>,结果对实际工程具有一定的指导意义,但是实验中很难准确控制各起爆点的起爆时间。起爆时间的误差会对实验结果有很大影响,而且,所有这些实验都是以小尺寸的柱状装药为研究对象,几何尺寸远小于实际工程中的条形药室,所以,结果还不能完全反映条形药包爆破作用规律。

### 3 基于 Starfield 迭加法的条形药包爆炸应力场分析模型

实际爆破工程表明,如果条形药包在介质中爆炸能获得近似柱面波的均布应力场,则往往能实现较好的爆破效果。然而,实际工程中条形药包只能设置有限个起爆点,无法实现瞬时爆轰,爆轰波沿装药轴线方向传播的时间效应必然影响条形药包爆炸应力场的均匀性。因此,要研究条形药包爆炸应力场的特征,必须重视起爆点这一关键因素,应该建立考虑起爆点因素的条形药包爆炸应力场分析模型,全面分析起爆点与爆轰波的传播对条形药包爆炸应力场形成与发展规律的影响,并在此基础上通过调整起爆点的数量与位置来实现理想的应力场分布。

在现有的条形药包爆炸应力场研究方法中,Starfield 迭加法把条形装药爆破作用分解为有限多个等效单元球状药包迭加的基本思想,能充分模拟爆轰波在装药方向上的传播,从而研究起爆点数量及位置的不同对条形装药爆炸应力场的影响。动力有限元法能够灵活处理各种复杂的本构关系、边界条件及加载过程,如果与 Starfield 迭加法结合,可以弥补后者忽略介质本构关系的缺陷。另外,有限元法可以模拟任意尺度的爆破介质,并能精确控制起爆时间,从而根本上克服实验手段的内在不足。

因此,本文中综合 Starfield 迭加法与动力有限元法,提出了一种分析条形药包爆炸应力场发展规律的新模型,基本思路为:利用 Starfield 迭加原理将条形药包分解为一定数量的单元球药包的迭加,并建立条形药包爆炸动力有限元分析模型。在进行有限元分析时,用各等效单元球药包在不同时刻爆炸冲击作用的迭加来代替条形药包爆炸对药室边界的冲击作用。因此,当起爆点确定后,就可以通过炸药爆速和各单元球药包与起爆点之间的距离来确定各自发生爆轰的时间,从而明确每一个单元球药包对药室的加载起始时刻。因而起爆点的数量与位置不同,各单元球药包的起爆时间就不同,这样就可以描述爆轰波在条形装药中的传播过程。只要获得了单元球药包爆炸荷载曲线,在不同的时刻分别将各单元球药包爆炸荷载施加于有限元模型上,通过动力有限元程序就可以获得介质中激发的爆炸应力场的发展规律。

### 4 条形药包爆炸应力场数值模拟

在实际条形药包爆破工程中,由于岩石的不连续、非均匀与各向异性等性质,爆炸应力波在岩石中的传播规律很难准确把握。另外,条形药包爆炸对药室产生的冲击作用也很复杂。在采用 Starfield 迭加原理进行动力有限元分析时,考虑到本文重点在于揭示起爆点对条形药包爆炸应力场的影响规律,爆轰波沿装药方向传播的时间效应是需要考虑的主要问题,为了方便计算,在建立有限元模型过程中做了如下简化假设:(1)认为条形药包在均匀、各向同性的弹性介质中爆炸,不考虑介质的塑性变形及药包近区的介质破碎。这样,就可以用经典的弹性动力有限元法对问题进行求解。(2)假设条形药包在无限介质中爆炸,不考虑应力波在边界处的反射。但是,在建立有限元模型时,无限介质区域总是以有限区域代替的,应力波到达边界时将变得难以处理。根据介质纵波波速选择合适的有限区域,确保计算时间小于应力波传播至边界所需的时间,就可以来模拟爆炸应力波在无限介质中起始时段的传播,这对研究

条形药包爆炸应力波的发展已经足够。(3)将单元球药包爆炸荷载简化为三角形分布(见图 1)。事实上,条形药室尺寸与装药量均较大,其爆炸荷载在药室边界上的作用相当复杂。在采用 Starfield 迭加原理后,问题转化为对单元球药包爆炸荷载的处理。对以往各种爆炸荷载的实测资料进行分析认为,将爆炸荷载简化为三角形分布不失一般性,因此,在动力有限元模型中,单元球药包的加载过程采用三角形分布曲线。

在上述三个简化假设条件下,利用某有限元软件的动力分析程序研究起爆点对条形药包爆炸应力场的影响,建立的有限元分析模型如图 2 所示。弹性介质的密度为  $2600\text{kg/m}^3$ ,泊松比为 0.25,弹性模量为 25GPa,药室半径为 1.5m,药室长 31.5m,长径比为 21,炸药爆速为 3km/s。单元球药包爆炸的峰值荷载  $p_m = 2.5\text{GPa}$ ,加载时间  $t_1 = 80\mu\text{s}$ ,卸载时刻  $t_2 = 300\mu\text{s}$ 。在对单点起爆、多点同时起爆等工况下条形药包爆炸在介质中激发的应力场特征模拟后,分析了起爆点数量对条形药包爆炸应力场的影响;对起爆点数量相同而起爆点位置不同的模拟结果对比后,分析了起爆点位置对条形药包爆炸应力场特征的影响。由于篇幅所限,本文中仅列出部分模拟结果。

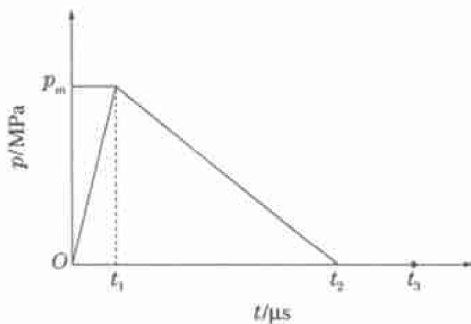


图 1 单元球药包爆炸荷载曲线

Fig. 1 The blast loading curve of element spherical charge

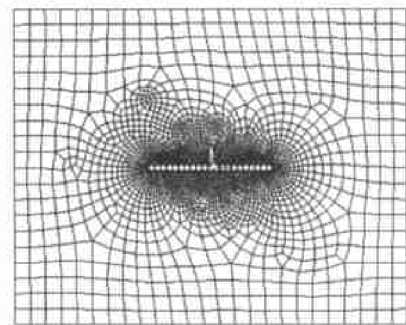


图 2 有限元模型

Fig. 2 FEM model

图 3 与图 4 分别是条形药包在中心单点起爆情形下某一时刻(3.5ms)的等效应力分布图与位移矢量图。分析发现,中心起爆点起爆后,随着时间的推移,爆轰波从中心向两端传播,在整个爆轰波的传播过程以及爆轰完成后,介质中的等效应力都接近球形分布。因此,条形药包在中心单点起爆情况下,介质中激发的应力场接近球形,类似集中装药爆破,实际条形药包爆破工程中,采用单点起爆往往不能获得满意的爆破效果。

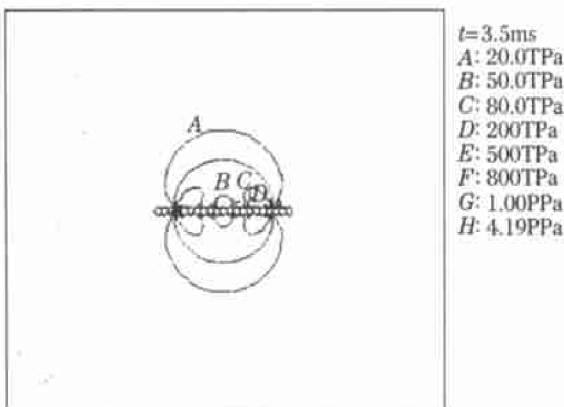


图 3 中心单点起爆的等效应力分布图

Fig. 3 Equivalent stress distribution detonated at midpoint

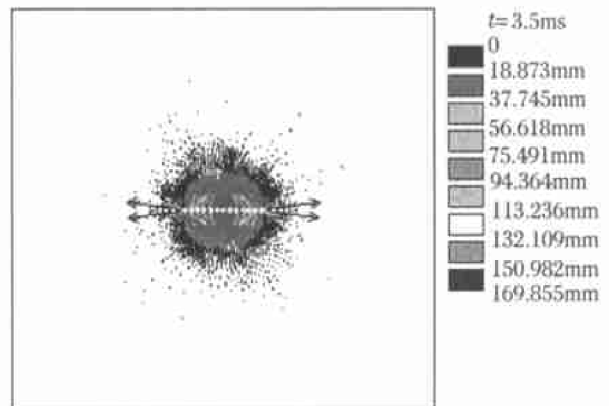


图 4 中心单点起爆的位移矢量图

Fig. 4 Displacement vector graph detonated at midpoint

由于单点起爆在介质中激发的应力场很不均匀,适当增加起爆点。图 5 与图 6 分别为三点同时起爆(2.9ms)与五点同时起爆(1.4ms)情形下的等效应力分布图。三点起爆采用药包两端与中心各布起爆点。三点同时起爆后,从中心点向两端传播“球形”应力分布,同时,从两端向中心传播“心形”应力

分布,三者相遇后,由于迭加作用,整个介质中的应力分布逐渐呈现出条形应力分布特征(图 5)。在此基础上增设两个起爆点(图 6),1.4ms 时介质中的应力场已经呈现较理想的条形分布。可以得出结论:随着起爆点的增加,条形药包爆炸后在周围介质中形成的应力分布逐渐接近柱状应力分布,起爆点越多,应力分布的柱状特征越明显,且形成柱状应力分布的时间越早。因此,在实际条形药包爆破工程中,为了获得较理想的爆炸应力场,实现满意的爆破效果,应该采用多点起爆。但本文中对六点同时起爆模拟后发现,介质中的应力场呈现理想的柱状分布的时间比五点起爆微有提前,因此,没必要盲目增加起爆点。

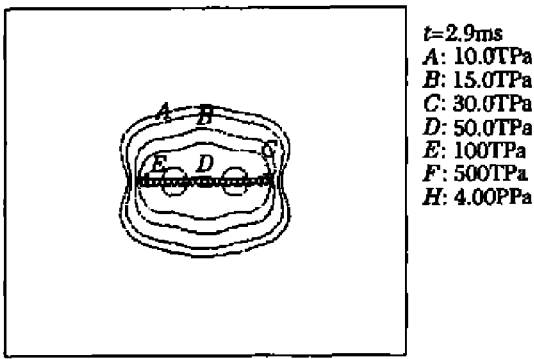


图 5 三点同时起爆等效应力分布图  
Fig. 5 Equivalent stress distribution detonated at three points

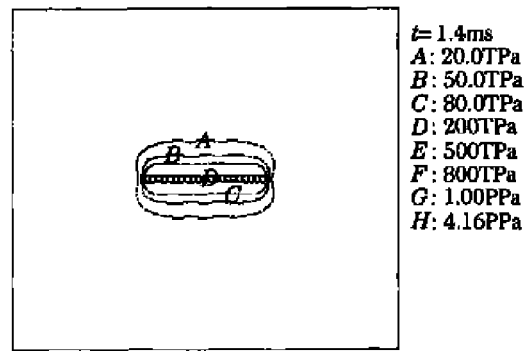


图 6 五点同时起爆等效应力分布图  
Fig. 6 Equivalent stress distribution detonated at five points

另外,分析了起爆点位置对条形药包爆炸应力场分布的影响。采用两种不同的三点起爆模式,一种是前文提到的在两端与中心各布设一个起爆点,另一种如图 7 所示(图中黑点为起爆点)。对图 7 起爆方式的模拟结果分析发现,与前文中的三点起爆方式相比,介质中应力分布的柱状特征更明显,出现的时间更早。因此,该起爆方式更有利于形成柱状应力分布。图 8 与图 9 分别是该起爆方式在 2ms 时刻的等效应力分布图与位移矢量图。不难看出,图 7 起爆方式之所以更有利于形成柱状分布的应力场,是因为这种布设方式减小了起爆点之间的距离,从而缩短了整个药包完成爆轰的时间,这与增加起爆点数量本质上相同。对于实际条形药包爆破工程,不仅要设置一定数量的起爆点,而且要合理安排各起爆点之间的相对位置,尽量减少药包完成爆轰的时间,从而尽可能减小爆轰波沿轴线方向传播的时间效应对条形药包爆炸应力场均匀性的影响。



图 7 起爆点示意图  
Fig. 7 Sketch map about three detonating points

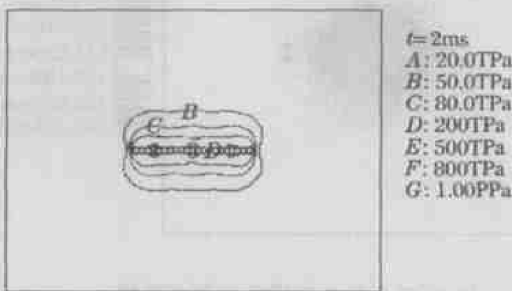


图 8 三点起爆的等效应力分布图  
Fig. 8 Equivalent stress distribution detonated at three points

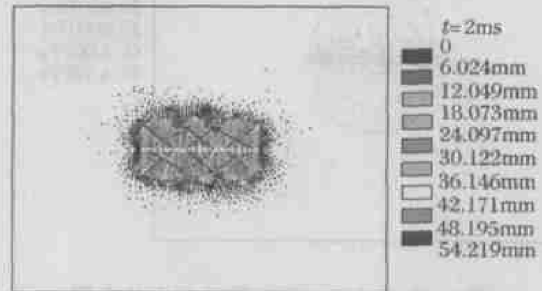


图 9 三点起爆的位移矢量图  
Fig. 9 Displacement vector graph detonated at three points

## 5 结 论

建立了基于 Starfield 迭加原理的分析模型, 采用弹性动力有限元法定性分析了起爆点数量及布设方式对条形药包爆炸应力场的影响, 得出了一些对工程实践具有一定参考价值的结论:

(1) 中心单点起爆激发的应力场接近球形分布, 爆破作用类似于集中装药爆破。单点起爆往往难以获得满意的爆破效果。

(2) 采用多点同时起爆, 条形药包能够获得良好的应力场分布, 起爆点越多, 分布越理想。但是起爆点增加到一定数量后, 这种改善效果将不明显。实际工程中, 不必盲目增加起爆点。

(3) 在起爆点数相同的情况下, 改变起爆点的位置能够改善条形药包的应力场。对于一定数量的起爆点, 合理安排各自之间的相对位置, 使整个药包完成爆轰的时间最短, 就能获得最佳应力分布。

## 参考文献:

- [1] 王礼力. 应力波基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985: 194—201.
- [2] Starfield A M, Pugliese J M. Compression waves generated in rock by cylindrical explosive charges: A comparison between a computer model and field measurements[J]. International Journal Rock Mechanics and Mining Sciences, 1968, 5: 65—77.
- [3] Neiman I B. Modeling the explosion of a system of borehole charges in a scarp[J]. Soviet Mining Science, 1987, 2: 108—113.
- [4] 卢文波, 朱传云, 赖世骧, 等. 条形药包的空腔发展过程模拟[J]. 爆炸与冲击, 1996, 16(2): 171—177.  
LU Wen-bo, ZHU Chuan-yun, LAI Shi-xiang, et al. Simulation of cavity expansion with strip-shaped explosive charge [J]. Explosion and Shock Waves, 1996, 16(2): 171—177.
- [5] 杨年华. 条形药包爆破现状与展望[J]. 爆炸与冲击, 1994, 14(3): 242—248.  
YANG Nian-hua. Present situations and prospect of blasting with linear explosive charges [J]. Explosion and Shock Waves, 1994, 14(3): 242—248.
- [6] 杨年华. 条形药包端部效应的研究[J]. 爆炸与冲击, 1997, 17(3): 214—219.  
YANG Nian-hua. The blasting effect at the end of a linear charge [J]. Explosion and Shock Waves, 1997, 17(3): 214—219.
- [7] 邓志勇, 张志毅, 王中黔. 条形药包端部爆炸应力场的动光弹试验研究[J]. 爆炸与冲击, 1996, 16(1): 86—90.  
DENG Zhi-yong, ZHANG Zhi-yi, WANG Zhong-qian. Dynamic photo-elastic studies of explosive stress field at the charge [J]. Explosion and Shock Waves, 1996, 16(1): 86—90.
- [8] 颜事龙, 冯叔瑜, 金孝刚. 有机玻璃中条形药包爆炸破碎区发展过程的高速摄影研究[J]. 爆炸与冲击, 1998, 18(3): 262—267.  
YAN Shi-long, FENG Shu-yu, JIN Xiao-gang. Study on fracture region of exploding in PMMA by high speed photograph [J]. Explosion and Shock Waves, 1998, 18(3): 262—267.
- [9] 吉国栋, 陈叶青, 于亚伦, 等. 条形药包爆炸应力场的全息动光弹研究[J]. 工程爆破, 1999, 5(4): 20—24.  
JI Guo-dong, CHEN Ye-qing, YU Ya-lun, et al. Study on stress field from linear charge explosion by dynamic holophotoelastic method [J]. Engineering Blasting, 1999, 5(4): 20—24.
- [10] 邓志勇, 张志毅, 王中黔. 条形装药爆炸应力场试验研究[J]. 工程爆破, 1995, 1(2): 31—34.  
DENG Zhi-yong, ZHANG Zhi-yi, WANG Zhong-qian. Experimental study on stress field of explosion of linear charge [J]. Engineering Blasting, 1995, 1(2): 31—34.
- [11] 龚敏, 黎剑华. 延长药包不同位置起爆时的应力场[J]. 北京科技大学学报, 2002, 24(3): 248—253.  
GONG Min, LI Jian-hua. A research on stress field of column and strip-shaped charge in different detonated points [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2002, 24(3): 248—253.

## Analysis of blast stress field of linear explosive charge based on starfield superposition method

XIANG Wen-fei<sup>\*</sup>, SHU Da-qiang, ZHU Chuan-bing

(*State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science,  
Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei, China*)

**Abstract:** The analyses of the chief theoretical methods and some important experimental results of linear explosive charge show that the time effect of the propagation of the blast wave through the linear explosive charge is the main factor which influences the character of the blast stress field of the linear explosive charge. Combining the starfield superposition method with dynamic finite element method, a numerical model of blast stress field of linear explosive charge is proposed based on starfield superposition fundamental. The evolution and formation of the blast stress field of the linear explosive charge are analyzed in different detonating modes. Some useful conclusions to direct engineering practice are obtained.

**Key words:** mechanics of explosion; blast stress field; starfield superposition method; linear explosive charge

---

\* Corresponding author: XIANG Wen-fei  
E-mail address: sdq62@sina.com  
Telephone: 027-62326955