DOI: 10.11883/1001-1455(2017)03-0544-05

爆轰波碰撞的聚能效应*

缪玉松,李晓杰,王小红,闫鸿浩,陈 翔
(大连理工大学工程力学系工业装备结构分析国家重点实验室,辽宁 大连 116024)

摘要: 利用两高爆速导爆索对称布置于药卷两侧,起爆后炸药爆轰波在对称线处汇聚碰撞,当碰撞角度达到一定值时,发生马赫反射,使爆轰压力成倍增加,形成高压、高能量密度区域的聚能效应。本文在爆轰波传播碰撞理论的基础上,通过炸药做功能力和猛度试验验证爆轰波碰撞的聚能效果。做功能力试验结果表明爆轰波碰撞能够增加炸药能量利用率;猛度试验结果表明采用对称起爆技术下的爆轰波碰撞能够改变爆轰波在特定方向上的扩散作用。试验结果与爆轰波入射角的几何关系表明,当高爆速起爆药条与主装药爆速比例在 1.15 倍以上时,爆轰波碰撞能够达到一定的聚能效果。

关键词: 爆轰波;聚能效应;马赫反射;铅墙法;铅柱压缩法
中图分类号: O389 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

爆轰波碰撞聚能效应是利用对称高爆速炸药条带动低爆速主装药爆轰,使爆轰波在中心线上发生汇聚碰撞,产生马赫反射且爆轰压力成倍提高的现象。自爆轰波反射被发现以来,科研工作者便开始通过理论分析、数值计算和现场试验等对爆轰波传播过程进行研究[1-2]。冯其京等[3]采用二维有限差分法欧拉程序对聚能装药的爆轰波形成、传播及相互作用过程进行模拟;秦健飞等[4]运用瞬时爆轰理论对双聚能爆轰的散射面进行分析,求得炸药的有效利用率;赵长啸等[5]利用 LS-DYNA 3D 有限元软件对多点起爆时爆轰波碰撞过程进行数值模拟,发现在碰撞位置出现超压现象;刘建青等[6]通过数值模拟研究不同起爆点数对爆炸成型弹丸性能的影响;曹雄等[7]得出在保证时间同步的情况下,增加起爆点有利于提高环形传爆药柱输出的压力;韦祥光[8]在分析爆轰波传播碰撞的基础上进行了铝板压缩试验,从客观上反映了爆轰波碰撞爆压增强的现象;王宇新等[9]运用物质点法模拟爆轰波传播及碰撞过程,验证了爆轰波碰撞导致爆压增强的现象。本文中以爆轰波碰撞理论为基础,通过炸药做功能力和猛度试验验证爆轰波碰撞的聚能效应。

1 爆轰波碰撞相关理论

根据 C-J 理论和爆轰产物状态方程,炸药爆轰压力可由下式[10]求解:

$$p=\rho_0 D^2/(k+1) \tag{1}$$

式中:ρ_0 为炸药的装药密度;D 为炸药爆速。k 为炸药多方指数,对于装药密度大于 1.0 g/cm^3 的炸药,其值可由下式[11]求解得到:

$$k=\frac{(1.01+1.313\rho_0)^2}{1.558\rho_0}-1 \tag{2}$$

联立(1)和(2)式可得,对于密度为 1.47 g/cm^3、爆速为 6 500 m/s 的导爆索等高能炸药,其爆轰压力为 16 GPa;而对于密度为 1.0 g/cm^3、爆速为 3 600 m/s 的硝酸铵类工业炸药,其爆轰压力为 4 GPa,仅为上述炸药爆轰压力的 25%。因此,若能将普通硝铵类工业炸药的爆轰压力提高到高能炸药爆轰压力的水平,扩大炮孔破碎区的范围,对提高爆破效果有重要意义。

根据爆轰波反射理论[10],当两爆轰波发生正碰撞时,可认为其中一条爆轰波与刚壁面发生正反射,

* **收稿日期**: 2015-09-22; **修回日期**: 2015-11-30
基金项目: 国家自然科学基金项目(10972051,11272081)
第一作者: 缪玉松(1986—),男,博士研究生; **通信作者**: 李晓杰,dalian03@qq.com。

反射后与反射前的爆轰压力比 β_1 与炸药多方指数 k 之间的关系式为：

$$\beta_1=\frac{5k+1+\sqrt{17k^2+2k+1}}{4k} \tag{3}$$

对于 $k=2.8$ 的导爆索等高能炸药，碰撞造成的压力增长比为 2.4；即使对于 $k=1.5$ 的低密度硝酸铵类工业炸药，碰撞造成的压力增长比仅为 2.5。可见正反射爆轰的超压对 k 值并不敏感。然而，随着爆轰波碰撞角度的增大，两爆轰波将以斜入射的方式发生反射。此时，爆轰压力比 β_2 可由下式求得：

$$\beta_2=\frac{(k+1)\tan(\phi+\theta)-(k-1)\tan\phi}{(k+1)\tan\phi-(k-1)\tan(\phi+\theta)} \tag{4}$$

式中：ϕ 为爆轰波反射角；θ 为斜入射后爆轰波的偏转角，其值可由下式求解得到：

$$\theta=\frac{\tan\varphi}{k\ \tan^2\varphi+k+1} \tag{5}$$

式中：φ 为爆轰波入射角。根据文献[10]爆轰波入射角 φ 与反射角 ϕ 的关系为：

$$\frac{\tan\phi}{\tan\left(\phi+\arctan\dfrac{\tan\varphi}{k\ \tan^2\varphi+k+1}\right)}=\frac{k-1}{k+1}+\frac{2k^2}{(k+1)[k^2+(k+1)^2\ \cot^2\varphi]\ \sin^2\left(\varphi+\arctan\dfrac{\tan\varphi}{k\ \tan^2\varphi+k+1}\right)} \tag{6}$$

联立(2)和(4)～(6)式，对于密度 1.0 g/cm³ 的炸药，可求得爆轰波发生斜反射时的爆压增长比 $\beta_2=2.41$～2.61。当入射角达到 46.4°时，若继续增大，此时反射角 ϕ 无解，说明反射波已经脱离固壁，产生马赫反射现象，如图 1 所示。根据斜冲击波马赫反射理论，若将马赫反射爆轰波释放的能量近似的认为与正常爆轰相同时，则马赫反射后的爆压与正常爆压的比 β_3 可用下式表述：

$$\beta_3=1/(1-\cos\varphi) \tag{7}$$

至此，在柱状截面两侧对称起爆时，爆轰波首先在中心线处发生正碰撞，随后以斜入射的方式发生反射，当入射角度达到 46.4°时，则产生马赫反射，使爆压升高达到 3.22 倍，远超过正碰撞和斜反射的 2.41～2.61 倍。由此可见，通过爆轰波碰撞能够达到爆压增强的目的。

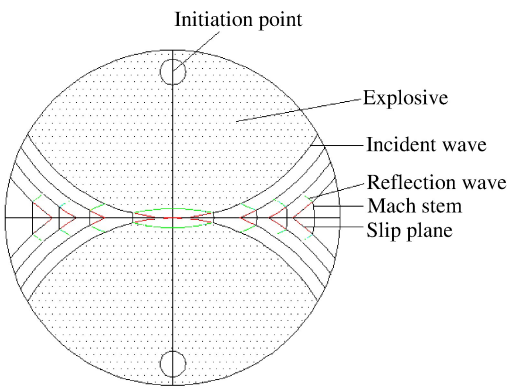

图 1 爆轰波碰撞形成马赫反射示意图

Fig. 1 Mach reflection results from detonation wave collision

2　炸药做功能力试验

2.1　爆轰波聚能炸药做功能力测试方法

铅壔法作为一种传统的炸药做功能力检测方法，由于其不需要特殊的设备，操作流程简便，已成为国际上公认的标准检测方法。根据铅壔法试验标准[12]，设计 4 组试验：(1)对称分离式导爆索起爆(简称分离式)，用于验证爆轰波碰撞的聚能效果；(2)电雷管起爆，用于模拟正常爆破作业；(3)中心并拢式双导爆索(简称并拢式)，用于形成对比试验，观察中心连续起爆效果；(4)仅双导爆索，用于修正导爆索的做功能力。试验时，称取等质量(10 g)的炸药并用模具压至相同的密度(1.0 g/cm³)进行试验。为减少误差，每组试验进行 2 次平行试验取均值，现场试验如图 2 所示。



图 2 炸药做功能力现场试验

Fig. 2 Test field of explosive-determination of power

2.2 试验结果及分析

试验时现场温度为－14 ℃，利用插值法确定体积修正为＋12%，试验数值如表 1 所示。从表 1 可知，铵油炸药在电雷管起爆下的扩容体积为 229.25 ml，利用分离式导爆索起爆的扩容体积与并拢式相当，比电雷管起爆的扩容体积提高 13.06%。对爆破后的 3 组铅墩孔深度变化进行测量，分离式导爆索起爆后的孔深增加值为 18 mm，比并拢式起爆提高 16.13%，比电雷管起爆提高 80%。这表明运用分离式起爆能够实现爆轰波的碰撞，达到提高炸药能量利用率和局部聚能的目的。

表 1 炸药做功能力试验结果

Table 1 Test results of explosive-determination of power

编号	起爆方式	爆前体积/ml	爆后体积/ml	起爆器具修正/ml（去除雷管和导爆索影响）	体积差均值/ml	爆前孔深/mm	爆后孔深/mm	孔深差均值/mm
1	电雷管	60.00	279.00	－24.64	229.25	125.00	135.00	10.00
2		60.00	296.00	－24.64		125.00	135.00	
3	并拢式	63.00	300.00	－11.72	261.14	125.00	142.00	15.50
4		63.00	315.00	－11.72		125.00	139.00	
5	分离式	63.00	316.00	－11.72	259.19	125.00	144.00	18.00
6		64.50	297.00	－11.72		125.00	142.00	
7	仅双导爆索	65.00	75.00		11.72			
8		65.00	76.00					

3 炸药猛度试验

3.1 猛度试验测试方法

根据标准猛度试验测试方法[13]，为了验证不同爆速炸药的对称起爆聚能效果，分别选取蓬松硝酸铵、乳化炸药和黑索金 3 种炸药，每种炸药又分分离式、电雷管、并拢式 3 种起爆形式，每种起爆形式进行不少于 2 组的平行试验。制作药卷时，分别称取(50±0.1)g 炸药，用模具将每组炸药压至相同的密度，试验结果见图 3。



图 3 炸药猛度现场试验

Fig. 3 Test field of explosive-determination of brisance

3.2 试验结果与分析

试验后，分别测量并计算铅柱的压缩高度，试验结果如表 2 所示。由表 2 可知，采用分离式高爆速导爆索起爆低爆速蓬松硝酸铵的平均压缩值较乳化炸药高 44.25%。相对于另外 2 种起爆方式，分离式起爆的压缩值较电雷管起爆降低 8%，较并拢式起爆提高 5.9%。从试验结果来看，分离式和并拢式起爆并没使炸药猛度值提高，反而有所降低。主要原因是分离式起爆时，高爆速炸药爆轰后形成的高压气体空腔，加速了爆轰波的释放。但爆轰波在中心位置的碰撞，使得释放的爆轰波得到部分补偿；并拢式起爆时，爆轰波从药柱中心往上冲出，使下向爆轰波发生衰减，极大地减少了作用在钢板上的爆轰压力，使铅柱压缩值大幅下降。然而，对于与高爆速起爆药条导爆索爆速相当的黑索金来说，并拢式起爆较电雷管起爆铅柱压缩值仅降低 1.2%，且在分离式起爆黑索金时，由于爆轰波碰撞作用使爆压强度的增大，致使铅柱在中心发生劈裂。说明此时，爆轰波扩散和传播的速度相当，爆轰空腔并没有使爆轰波能量大范围释放。

李晓杰等[14]指出当高爆速炸药为低爆速炸药爆速的 1.15 倍以上时的爆轰波碰撞，才会产生斜反射或马赫反射现象。该结果与导爆索起爆低爆速炸药蓬松硝酸铵和乳化炸药时猛度降低的现象吻合。同时，也为导爆索在起爆与其爆速相当的黑索金时不能达到聚能效果提供了试验支持。

表 2 炸药猛度试验结果

Table 2 Test results of explosive-determination of brisance

炸药类型	编号	起爆方式	铅柱高度/mm			
			爆前	爆后	高差	高差平均
蓬松硝酸铵（爆速 2 500 m/s）	1(1)	电雷管	59.70	47.39	12.31	12.08
	2(2)		59.60	47.76	11.84	
	3(3)	并拢式	60.10	48.60	11.51	10.70
	4(4)		59.83	49.94	9.89	
	5(5)	分离式	60.03	49.16	10.87	11.46
	6(6)		59.75	47.70	12.05	
乳化炸药（爆速 3 400 m/s）	7(9)	电雷管	60.07	51.44	8.63	8.52
	8(10)		60.37	51.97	8.40	
	9(15)	并拢式	60.15	52.89	7.26	7.30
	10(16)		60.08	52.74	7.35	
	11(17)	分离式	59.60	52.16	7.45	7.90
	12(18)		60.13	51.78	8.35	
黑索金（爆速 6 800 m/s）	13(13)	电雷管	59.97	38.83	21.14	22.73
	14(14)		60.01	36.23	23.78	
	15(7)	并拢式	60.23	37.62	22.61	22.46
	16(8)		59.85	37.01	22.85	
	17(11)	分离式	60.13			
	18(12)		60.09			

注：编号()中的数字对应图 3 中试验后铅柱上的标号。

4 结　论

在爆轰波传播发生正碰撞、斜碰撞和马赫反射理论的基础上，开展炸药做功能力和猛度标准试验，验证爆轰波碰撞的聚能效果，根据试验结果得出以下结论：

(1)高爆速导爆索起爆低爆速炸药，使爆轰波在中心线处汇聚碰撞。当发生正规碰撞时，爆压可达到爆轰压力的 2.4 倍，随后产生爆轰波的斜反射，当爆轰波入射角增大至 46.4°时(密度 1.0 g/cm^3 的炸药)，产生马赫反射，爆压可增加至 3.22 倍，达到爆压增强，实现聚能效应的目的。

(2)炸药做功能力试验结果表明，分离式与并拢式导爆索起爆做功能力基本相同，比雷管起爆做功能力提高 13.06%；但试验后分离式导爆索起爆的孔深却比并拢式起爆提高 16.13%，比雷管起爆提高 80%。说明采用分离式起爆技术能够实现爆轰波碰撞，达到提高炸药做功能力的目的。

(3)炸药猛度试验结果表明，只有当高爆速炸药条与低爆速主装药达到一定爆速比例时，才能达到较好的聚能效果。验证了欲使爆轰波达到碰撞聚能的效果，高爆速起爆药条的爆速至少应为低爆速主装药爆速的 1.15 倍。

参考文献：

[1] Dunne B. Mach reflection of detonation waves in condensed high explosives Ⅱ[J]. Physics of Fluids, 1964,7(10): 1707-1712.

[2] Bohr H, Courant R, Stoker J J. Supersonic flow and shock waves[M]. New York: Interscience Publishers, 1948: 331-346.

[3] 冯其京，何鹏程，杭义洪，等. 聚能装药的欧拉数值模拟[J]. 爆炸与冲击，2008,28(2):138-143.
Feng Qijing, He Pengcheng, Hang Yihong, et al. Eulerian numerical simulation of a shaped charge[J]. Explosion and Shock Waves, 2008,28(2):138-143.

[4] 秦健飞. 双聚能预裂与光面爆破技术[M]. 北京：中国水利水电出版社，2014：45-48.

[5] 赵长啸，龙源，纪冲，等. 多点起爆下药型罩表面压力分布规律研究[J]. 高压物理学报，2013,27(1):83-89.

Zhao Changxiao, Long Yuan, Ji Chong, et al. Distribution law of pressure on linear surface under multi-point initiation[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2013,27(1):83-89.

[6] 刘建青,顾文彬,徐浩铭,等. 多点起爆装药结构参数对尾翼 EFP 成型的研究[J]. 含能材料,2014,22(5):594-599.
Liu Jianqing, Gu Wenbin, Xu Haoming, et al. Effects of multi-point initiation charge configuration parameters on EFP with fins formation[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2014,22(5):594-599.

[7] 曹雄,刘瑛,胡双启,等. 环形传爆药柱多点起爆数值模拟及威力测试[J]. 火工品,2005,12(5):16-18.
Cao Xiong, Liu Ying, Hu Shuangqi, et al. Numerical simulation and power test on the annular booster initiated by multi-point explosive circuit[J]. Initiation Pyrotechnics, 2005,12(5):16-18.

[8] 韦祥光. 爆轰波聚能爆破的技术基础研究[D]. 大连:大连理工大学,2012:40-43.

[9] 王宇新,李晓杰,闫鸿浩,等. 爆轰波碰撞聚能无网格 MPM 法数值模拟[J]. 计算力学学报,2014,31(2):223-227.
Wang Yuxin, Li Xiaojie, Yan Honghao, et al. Simulation on assembling energy of detonation wave by using MPM [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2014,31(2):223-227.

[10] 孙新利. 内爆冲击动力学[M]. 西安:西北工业大学出版社,2011:37-50.

[11] 赵铮,陶钢,杜长星. 爆轰产物 JWL 状态方程应用研究[J]. 高压物理学报,2009,23(4):277-282.
Zhao Zheng, Tao Gang, Du Changxing. Application research on JWL equation of state of detonation products[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2009,23(4):277-282.

[12] 中华人民共和国机械电子工业部. 炸药做功能力试验-铅壔法:GB 12436-90[S]. 1991:1-4.

[13] 中华人民共和国机械电子工业部. 炸药猛度试验-铅柱压缩法:GB 12440-90[S]. 1991:1-10.

[14] 李晓杰,李瑞勇,马玉磬,等. 工业炸药线型聚能切割器的研制[J]. 工程爆破,2004,10(2):5-8.
Li Xiaojie, Li Ruiyong, Ma Yuqing, et al. Development of a linear shaped charge loaded with an industrial explosive[J]. Engineering Blasting, 2004,10(2):5-8.

Munroe effect of detonation wave collision

Miao Yusong, Li Xiaojie, Wang Xiaohong, Yan Honghao, Chen Xiang

(*State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian* 116024, *Liaoning*, *China*)

Abstract: The Mach reflection occurs when two high-detonation-velocity detonating cords are arranged symmetrically on both sides of the cartridge. After the detonation the explosive's detonation waves converge and collide along the line of symmetry, multiplying the detonation pressure and forming a Munroe effect region with high pressure and high energy density when the collision angle reaches a certain value. In this paper, explosive-determination of power and brisance tests were conducted based on the theory of detonation wave collision and reflection. The results from the test of the explosive-determination of power show that the detonation wave collision can improve the efficiency of the explosive energy utilization, and those from the test of the brisance show that the symmetrical initiation of the detonation can change its distribution in a particular direction. The geometrical relationship of the experimental results with the incidence angle of the detonation wave shows that, when the initiating explosive velocity is above 1.15 times that of the main charge, the detonation wave collision will produce a certain degree of Munroe effect.

Keywords: detonation wave; Munroe effect; Mach reflection; lead block test; lead cylinder compression test

(责任编辑 张凌云)