

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.03.002

## 水耦合装药不耦合系数对爆破效果的影响研究\*

李书萱<sup>1</sup>, 王雁冰<sup>1,2</sup>, 王宝珠<sup>1</sup>, 王兆阳<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083;

2. 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 为了研究水耦合装药条件下不同不耦合系数对爆破效果的影响, 采用透明均匀、直径 250 mm、高 200 mm 的圆柱体 PMMA 材料作为试件, DDNP 炸药用于施加爆破载荷, 试验中炸药量固定为 40 mg, 同时使用水耦合装药结构, 通过不同的孔径和装药直径来改变试验的不耦合系数, 通过比较爆后试件内部裂纹数量及分布、粉碎区大小等情况来分析三种不同的不耦合系数(1.4、2.0、2.67)对爆破效果的影响。通过对比发现: 适当增大水耦合装药的不耦合系数可以增多裂纹数量, 使裂纹分布更加均匀, 增大裂隙区, 减小破碎区直径。并发现存在一个最佳不耦合系数使得爆破效果达到最佳, 在 3 个不耦合系数中, 最佳不耦合系数为 2.67。试验利用 PMMA 材料的透明均匀特性对爆破断裂行为进行直观的观察, 试验结果更加可靠, 且对脆性材料普遍适用。

**关键词:** 水耦合装药; 不耦合系数; PMMA; 爆破效果

中图分类号: TD235 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2021)03-0006-04

## Influence of Decoupling Coefficient of Water-coupled Charge on Blasting Effect

LI Shu-xuan<sup>1</sup>, WANG Yan-bing<sup>1,2</sup>, WANG Bao-zhu<sup>1</sup>, WANG Zhao-yang<sup>1</sup>

(1. School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining & Technology(Beijing), Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to study the influence of different decoupling coefficients of water-coupled charge on blasting effect, a transparent and uniform cylindrical PMMA material with 250 mm in diameter and 200 mm in height was used as the test specimen. Meanwhile, a DDNP explosive was used to apply blasting load. In the test, the explosive quantity was fixed at 40 mg. At the same time, a water-coupled charge structure was used, and the decoupling coefficient was changed with different hole diameter and charge diameter. By comparing the number and distribution of internal cracks of the specimen and the size of crushing area, the effects of three different decoupling coefficients(1.4, 2.0, 2.67) on blasting effect were analyzed. It is found that appropriately increasing the decoupling coefficient of water-coupled charge can increase the number of cracks, make the crack distribution more uniform, increase the fracture area and reduce the diameter of the broken zone. Besides, there is an optimal decoupling coefficient to achieve the best blasting effect. Among the three uncoupling coefficients, the optimal decoupling coefficient is 2.67. In the test, the transparent and uniform characteristic of PMMA material are used to observe the blasting fracture behavior intuitively. The test results are very reliable and generally applicable to brittle materials.

**Key words:** water-coupled charge; decoupling coefficient; PMMA; blasting effect

如何提高炸药能量利用率、提高爆破效果同时降低爆破成本,一直都是实际爆破作业中急需解决的问题。随着爆破技术理论研究的日趋完善,许多不同的提高炸药能量利用率,提高爆破效果的方法被专家学者们发现并发展起来。龚玖等以理论结合室内爆破模型试验研究,探究了以空气和水为不同耦合介质时对爆破块度的影响<sup>[1]</sup>;宗琦等以水泥砂浆试块为试验模型,采用超动态应变测试系统对空气不耦合装药和水耦合装药的几种不耦合系数下炮孔周围介质中爆炸应力的分布特性进行了研究<sup>[2]</sup>;杨跃宗等利用数值模拟软件对径向不耦合与轴向不耦合装药结构进行了对比分析<sup>[3]</sup>;田浩等对以空气和聚苯乙烯(EPS)泡沫作为介质的径向不耦合装药结构的炸药能量利用率进行了对比<sup>[4]</sup>;付强等利用数值模拟软件对不耦合装药爆破的孔壁压力变化规律进行了分析<sup>[5]</sup>;岳中文等通过实验室实验以及数值模拟的方法,得到了空气不耦合装药爆破中的最佳不耦合系数<sup>[6]</sup>;庄又军等以新驿煤矿硬岩巷道为工程背景,验证了水介质耦合装药爆破的优越性<sup>[7]</sup>;苟倩倩等对连续耦合装药,空气径向、间隔不耦合装药和水不耦合装药爆破的爆破振动能量进行了对比分析<sup>[8]</sup>。

综上所述,关于径向不耦合装药结构的爆破机理与爆破效果的研究已经日趋完善,但是关于水耦合装药的径向不耦合系数对爆破效果的影响研究仍然较少,且以现场试验为主。为了在实验室内得到更直观可靠的试验数据,借鉴了 Hoyoung Jeong 等研究爆破荷载下脆性材料孔周围断裂行为的方法<sup>[9]</sup>,以透明均匀的 PMMA 材料作为试件,DDNP 炸药用于施加爆破载荷,使用水耦合装药结构和不同的不耦合系数,利用 PMMA 试件孔周围的断裂行为来评价并对比各自的爆破作用效果。

## 1 不同装药结构爆破试验

### 1.1 试件

试验采用 PMMA,全称聚甲基丙烯酸甲酯,又称作亚克力、有机玻璃,具有高透明度,易于机械加工等特点。由于 PMMA 高透明度的特性,使其在爆破试验中的断裂行为更容易被观察记录,因此 PMMA 被广泛用于研究爆破加载过程中的裂纹扩展行为。在试验中准备了三个圆柱形 PMMA 试件,并在每个试件的中心钻了一个小孔,试件与小孔的尺寸等数据见表 1,PMMA 材料物理性质参数见表 2。

表 1 试件规格参数表

Table 1 Specification parameters of test piece

编号	试件规格 (直径×高)	炮孔深度/ mm	炮孔直径/ mm	装药直径/ mm	不耦合系数	装药结构	装药量/ mg
1	250 mm × 200 mm	100	7	5	1.40	水耦合	40
2	250 mm × 200 mm	100	6	3	2.00	水耦合	40
3	250 mm × 200 mm	100	8	3	2.67	水耦合	40

表 2 PMMA 材料性质参数表

Table 2 PMMA material property parameters

密度/ (g × cm <sup>-3</sup> )	抗拉强度/MPa	抗压强度/MPa	I 型断裂韧性/ (MPa × m <sup>0.5</sup> )	泊松比	杨氏模量/MPa
1.18	151.00	62.00	2.50	0.40	3000.00

### 1.2 爆炸物及起爆器

试验使用 DDNP(二硝基重氮酚)炸药作为爆炸物,固定装药量为 40 mg,使用数字式高能脉冲起爆器进行起爆。DDNP 炸药的爆炸特性参数见表 3。

### 1.3 试件试验准备

试验使用水耦合装药结构,将 3 个相同规格(250 mm × 200 mm)的试件分别编号为“1、2、3”,其中试件 1、2、3 的孔径分别为 7 mm、6 mm、8 mm。分别将 40 mg DDNP 炸药填入直径为 5 mm、3 mm、3 mm 的透明吸管中,将金属导线埋入炸药中,最后用棉花堵塞吸管,然后将这三根吸管对应放入 1、2、3 号试件的小孔下部,并在周围灌入水,使水位距孔底 50 mm,然后用沙子堵塞小孔,试验前图片见下图 1。

收稿日期:2021-03-22

作者简介:李书莹(1998-),男,山西吕梁人,硕士研究生在读,从事水压爆破研究,(E-mail)496972430@qq.com。

通讯作者:王雁冰(1987-),男,山东潍坊人,博士后、副教授、硕士生导师,主要从事岩土爆破方面的研究,(E-mail)15535850438@163.com。

基金项目:中国矿业大学(北京)越崎青年学者资助项目资助(编号 800015Z11A24)

表 3 DDNP 爆炸特性参数表  
Table 3 DDNP explosion characteristic parameters

Density/( $\text{g} \times \text{cm}^{-3}$ )	VOD/( $\text{m} \times \text{s}^{-1}$ )	CJ Pressure/GPa	A/GPa	B/GPa	$R_1$	$R_2$	$\omega$	E/GPa
1.00	4500.00	5.06	524.20	0.769	4.20	1.00	0.30	8.50

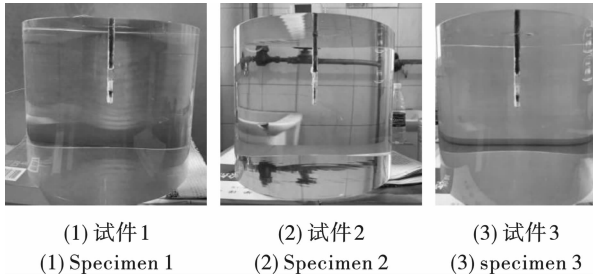


图 1 试验前试件图

Fig. 1 Specimen diagram before test

## 2 实验结果及对比

在试验过程中,可以观察到爆炸开始后,由于炸药的膨胀,爆炸孔的半径瞬间增大,首先在炮孔壁底部形成并传播了一个锥形断裂破碎区,并在破碎区的半径扩展到一定长度后,炮孔壁附近出现突出的

径向裂纹,这主要是由应力波的传播而引起的。径向裂纹在爆生气体膨胀作用下继续扩展并形成耳型裂纹。试件 1、2、3 的试验结果每  $60^\circ$  选取一张图片作为代表,实验结果见图 2。其中,选取试件 1 的一张图片作为代表来展示应力波驱动所形成的破碎区以及爆生气体驱动形成的耳型裂纹,见图 3。

根据试验结果来看,试件 1、2、3 均有 3 条爆生气体驱动的径向裂纹的半径大于试件半径,从而导致试件被炸裂成 3 块,根据试验后试件顶、底部照片来看,不耦合系数为 2.0 和 2.67 时 3 条贯通裂缝的夹角各自成近  $120^\circ$ ,即试件近似被炸裂为 3 等分,而不耦合系数为 1.4 时,试件明显被炸裂为 1 大 2 小的三块,说明不耦合系数为 2.0 和 2.67 时,爆炸对孔壁的压力更均匀。试件顶、底部图片见图 4。

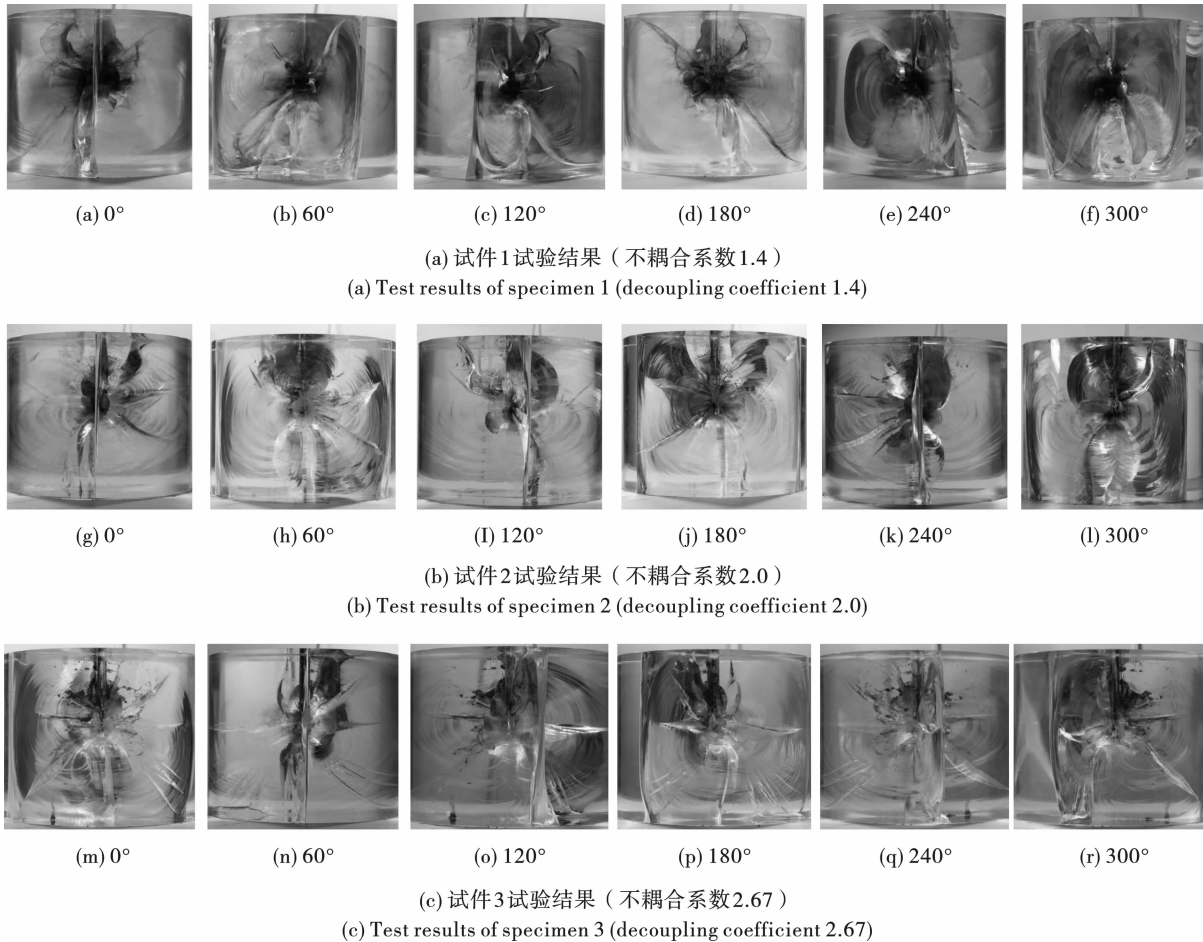


图 2 试验侧面结果图

Fig. 2 Test results

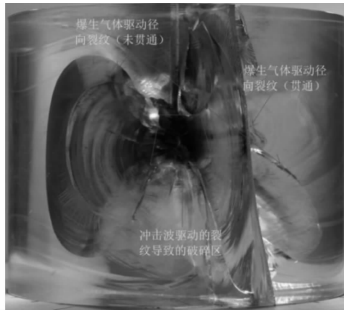


图 3 试件裂纹

Fig. 3 Crack of specimen

除了贯通裂缝,爆后试件内部还有未贯通的径向裂缝。经计数,试件 1 内部约有 6 道未贯通径向裂缝,裂纹大多数沿垂直于孔壁发展或沿炮孔壁向下发展;试件 2 内部约有 8 道未贯通径向裂缝,和试件 1 中裂纹类似,大多数沿垂直于孔壁发展或沿炮孔壁向下发展,但耳型裂纹的直径略短;试件 3 内部约有 9 道未贯通径向裂缝,裂纹多呈放射状,长度较长。同时从图中可以看出,当不耦合系数为 2.67 时,爆后试件的裂纹每 60°分布较为均匀,而另外两个分布差异性较大。

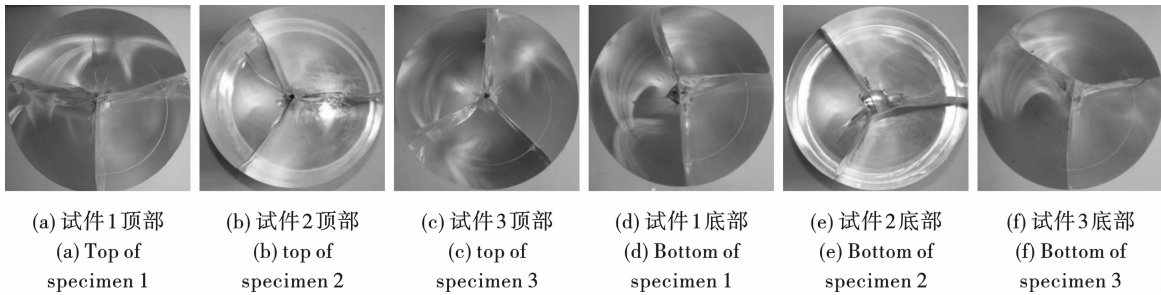


图 4 试件顶、底部图片

Fig. 4 Picture of the top and bottom of the specimen

除了裂纹外,还可以通过冲击波驱动裂纹所形成的破碎区底部直径大小进行分析。爆炸后试件底部可以看到破碎区底部区域,见图 5。爆后试件的裂纹及破碎区参数见表 4。

程中冲击能量的大小。粉碎区的体积可以近似认为是圆柱体,不耦合系数对粉碎区体积的影响,可以认为是通过对粉碎区的直径和高度的影响来影响粉碎区体积的。米中阳等通过模型试验证明在水耦合装药下<sup>[10]</sup>,不耦合系数对粉碎区的高度影响并不显著,主要是通过影响粉碎区的直径来影响粉碎区的体积。据试验结果可以看到,当不耦合系数为 1.4 和 2.0 时,破碎区底部直径约为 35 mm;当不耦合系数提升至 2.67 时,破碎区底部直径减小到 29.6 mm。综上可以分析出,当不耦合系数为 2.67 时,爆破能量用于粉碎试件的那部分占比减小了,更多的爆破能量用于产生径向裂纹,扩展了裂隙区的面积,同时,不耦合系数为 2.67 时,爆破产生的径向裂纹的方位、长度更加均匀,能产生更好的爆破效果。因此通过该实验可以得出,在 1.4、2.0、2.67 这几个不耦合系数中,水耦合装药的最佳不耦合系数应在 2.67 左右,该结果与林哲等利用 ANSYS/LS-DYNA 软件得到的在爆破水耦合装药下的最佳不耦合系数(为 2.6)基本相符<sup>[11]</sup>。

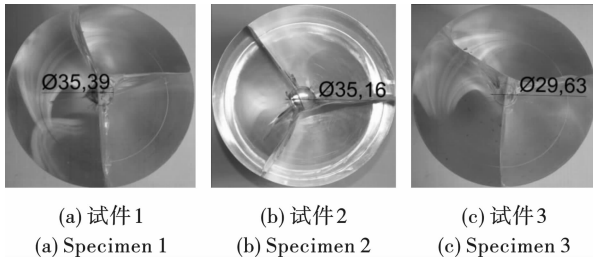


图 5 爆后试件破碎区直径

Fig. 5 Diameter of fracture zone

表 4 爆后试件裂纹及破碎区参数表

Table 4 Parameters of crack and fracture zone of specimen after blasting

编号	不耦合系数	贯通裂缝/条	未贯通裂缝/条	破碎区底部直径/mm
1	1.40	3	6	35.39
2	2.00	3	8	35.16
3	2.67	3	9	29.63

在 PMMA 模型试验爆破的过程中会产生高温、高压从而产生粉碎区,爆破冲击波阶段,一部分能量用于产生这个粉碎区,另一部分则用来产生裂隙,所以粉碎区体积的大小从一定程度上可以反映爆破过

### 3 结论

通过 PMMA 试件模型实验,进行了不同不耦合系数下的水耦合装药模型爆破实验,分析了水耦合装药不耦合系数对爆破效果的影响规律,实验结果表明: