

文章编号: 0253 - 9993 (2005) 02 - 0191 - 05

煤矿爆破异常现象发生机理研究

张少波¹, 高 铭², 滕 威², 颜事龙³

(1. 煤炭科学研究总院 南京研究所, 江苏 南京 210018; 2. 煤炭科学研究总院 爆破技术研究所, 安徽 淮北 235039; 3. 安徽理工大学, 安徽 淮南 232001)

摘 要: 分析了我国煤矿的爆破异常情况, 研究了煤矿许用乳化炸药和毫秒延期电雷管的动压特性, 对爆破异常机理进行了较全面的阐述, 并通过耐压型乳化炸药的研制探讨了预防和减少爆破异常现象的技术途径.

关键词: 煤矿爆破异常; 受压钝化机理; 耐压型乳化炸药

中图分类号: TD235 **文献标识码:** A

Study on the mechanism about blasting malfunction in coal mine

ZHANG Shao-bo¹, GAO Ming², TENG Wei², YAN Shi-long³

(1. Nanjing Research Institute, China Coal Research Institute, Nanjing 210018, China; 2. Blasting Technology Institute, China Coal Research Institute, Huabei 235039, China; 3. Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: Analyzed the condition of coal mine explosive malfunction in China, and researched the passivation mechanism of coal mining emulsion explosive and delay electric blasting cap, and discussed the avenue of researching the permitted emulsion explosive with the function of shock resistance

Key words: blasting malfunction in coal mine; passivation due to dynamic pressure and shock wave; emulsion explosive with the function of shock resistance

煤矿爆破作业可能产生爆破异常现象^[1], 一般表现形式为: 质量合格的炸药和雷管在井下爆破作业中出现崩煤能力降低、留残药、爆燃和拒爆等爆破异常现象. 起因源于先爆毗邻炮孔产生的应力波预先作用于次爆炮孔装药使其发生钝化, 这种现象将会成为多种煤矿安全事故的诱因^[1-4].

近 20 a 来, 国内外在该领域的研究内容可归纳为: 煤矿爆破异常现象的辨识、调查和分析^[3]; 静、动压作用下, 煤矿许用炸药爆轰性能变化及复原性的实验研究^[1,2]; 爆破工艺与异常爆破关系^[2,5]; 涉及炸药压力降敏的理论探讨^[6]. 上述研究开辟了煤矿爆破异常研究新领域并奠定了防治基础, 但对我国煤矿安全生产的指导作用受到限制: 我国煤矿异常爆破现象缺乏调查分析, 对其严重性和特征难作估计和判断, 妨碍了有效预防; 煤矿许用乳化炸药、延期电雷管受压钝化机理解释不全面; 预防措施和途径有待拓展. 笔者经对东北、山东、两淮等国有重点矿区的调研, 发现东北、山东部分矿区爆破作业现场存在爆破异常现象. 通过模拟实验, 表明我国煤炭生产中存在爆破异常现象, 而且具有重现性.

1 动压作用下的煤矿许用乳化炸药理化和爆炸性能变化特性

煤矿主体炸药是乳化炸药, 具有相对较强的抗受压钝化能力, 但复原能力差. 目前认为外部压力对体系敏感气泡的影响是其受压钝化机理, 而从乳化炸药理化结构角度分析, 研究钝化机理应考虑乳状液结构

收稿日期: 2004 - 06 - 29

作者简介: 张少波 (1960 -), 男, 安徽定远人, 研究员. Tel: 025 - 83618409, E-mail: zsb@mgzh.com, bbtzsb@sohu.com

的受压变化特性.

1.1 乳化炸药的乳状液结构受压变化特性的试验

试验分 3 个层次: 首先确定压力作用下乳状液结构破坏的可能性及时间范围; 其次应了解破坏的程度(内相粒子直径和分布变化); 在此基础上提出预防措施, 确定乳化炸药耐压型产品研制的技术途径.

采用摆锤冲击、电爆炸冲击加载动态高速摄影、乳化炸药动压钝化模拟实验装置实现上述试验意图. 乳化炸药样品按照目前典型工艺条件和基础配方制备. 试验结果分别见表 1~3 和图 1~5.

表 1 摆锤冲击作用下乳化炸药微结构变化的分析测试数据

Table 1 Test data about micro-structure change of emulsion explosive due to be impacted by pendular hammer

分析测试项目	普通试样					乳化剂含量增加试样						
	C-2-0	C-2-1	C-2-2	C-2-3	C-2-4	C-2-5	C-3-0	C-3-1	C-3-2	C-3-3	C-3-4	C-3-5
试样受到冲击压力 /MPa		2.93	3.67	4.32	4.79	5.24		3.30	3.97	4.89	5.46	6.18
试验冲击时间 /s		0.003	0.003	0.004	0.003	0.003		0.003 5	0.004 0	0.004 0	0.004 0	0.004 0
受试样品电导率 / $\mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$	0.048	0.100	0.150	0.250	1.000	1.050	0.027	0.051	0.052	0.055	0.660	1.080

注: 试样为二级煤矿型乳化炸药.

表 2 动压钝化模拟试验试样品种设计

Table 2 Samples design for simulation examination by the dynamic pressure

乳化剂品种	质量百分含量 /%				
	1.5	2.1	2.7	3.3	3.9
斯盘 - 80, 发泡剂	A1	A2	A3	A4	A5
复合型 (11), 发泡剂	C1	C2	C3	C4	C5
路博润 (2725), 发泡剂				D4	D5
pce, 玻璃微球		E			

注: 基础配方为气泡敏化的二级煤矿许用型乳化炸药.

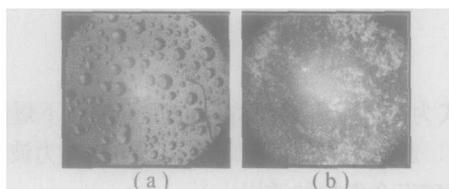


图 1 电爆炸冲击加载后试样的静态显微照片 (放大 46 倍)

Fig. 1 The micrographs of impact on samples due to electric explosive (46 times)

(a) 未受冲击药样的液珠照片; (b) 冲击后药样的显微照片

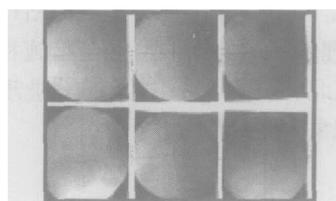


图 2 试样的动态高速摄影照片 (放大 3.5 倍)

Fig. 2 The high-speed photographic pictures of samples (3.5 times)

表 3 不同设计方案中各配方的耐压能力比较

Table 3 Comparison of pressure-resisting ability of different samples

样品种类	样品编号	乳化剂种类	临界钝化距离 /mm	临界钝化距离时乳化剂含量 /%
A	A1	S - 80	13	1.5
	A2	S - 80	13	2.1
	A3	S - 80	13	2.7
	A4	S - 80	10	3.3
	A5	S - 80	8	3.9
C	C1	S - 80/PCE	7	1.5
	C2	S - 80/PCE	7	2.1
	C3	S - 80/PCE	2	2.7
	C4	S - 80/PCE	2	3.3
	C5	S - 80/PCE	2	3.9
D	D4	M5	16	3.3
	D5	M5	16	3.9
E	E	PCE	27	2.0

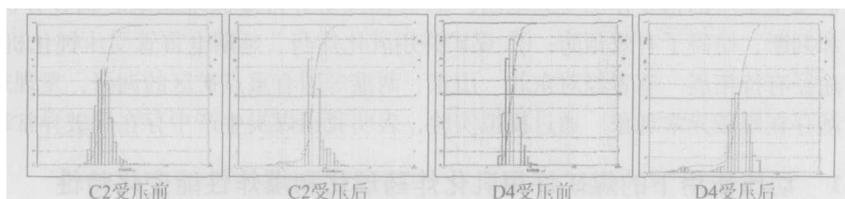


图 3 乳化炸药受压前后粒度的分布

Fig. 3 The granularity distribution graphs of emulsion explosives in shock wave

试验表明: 乳化炸药试样无论是受到冲击作用还是模拟动态压力作用, 作用前后的乳状液结构、体系电导率、粒径分布和粒子比表面积

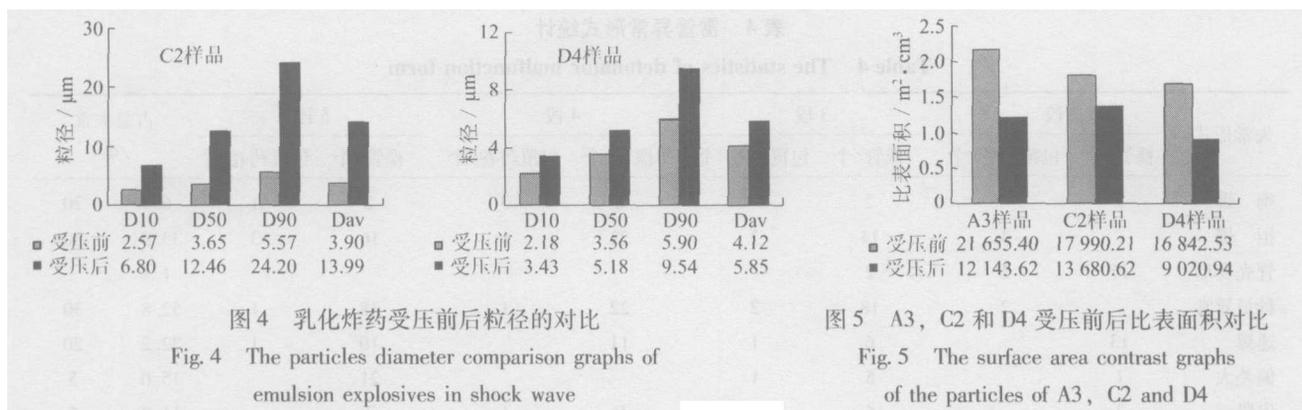


图4 乳化炸药受压前后粒径的对比

Fig. 4 The particles diameter comparison graphs of emulsion explosives in shock wave

图5 A3, C2 和 D4 受压前后比表面对比

Fig. 5 The surface area contrast graphs of the particles of A3, C2 and D4

都会发生变化, 说明了外界应力作用下, 乳化炸药钝化与其乳状液结构破坏的关联性. 摆锤冲击试验时, 体系微结构破坏的临界压力分别为 4.79 和 5.46 MPa (乳化剂含量增加试样); 电爆炸冲击加载试验显示在外界压力作用的最初 300 μ s 时, 体系已大面积结晶^[8] (图 2); 说明在爆破作业的延期时间内, 乳化炸药的乳状液结构是有可能遭到破坏的. 无论是受到冲击作用还是模拟动态压力作用, 耐压性与乳化剂均有密切关系, 尤其与含量存在正比关系. 进一步的分析可见: 乳状液粒径变化范围为 0.9 ~ 19.0 μ m, 其中以 D4 (M5 乳化剂, 含量 3.3%) 样的粒径变化幅度最大, C2 (复合型乳化剂, 含量 2.1%) 样的粒径变化幅度最小; 单位体积内粒子氧化剂和还原剂接触面积变化范围为 4 310 ~ 9 512 $\text{cm}^2 / \text{cm}^3$, 以 C2 (复合型乳化剂, 含量 2.1%) 样的变化幅度最小, 以 A3 (斯盘 - 80 型乳化剂, 含量 2.7%) 样的变化幅度最大.

1.2 乳化炸药受压钝化机理

通过试验和分析, 对于矿用乳化炸药的受压钝化机理可有较全面地认识, 即在延期爆破作业中, 爆炸应力波作用于后爆炮孔炸药, 首先使炸药乳状液结构受到扰动或破坏, 造成体系中氧化剂与还原剂的接触面积缩小, 气体产物渗透和扩散受到妨碍, 化学反应区完成反应时间延长、宽度增加, 径向膨胀波引起的能量损失加大, 导致乳化炸药感度降低、爆速下降, 后期敏感气泡也遭到破坏, 造成起爆“热点”进一步减少, 直至爆轰反应中断.

2 延期爆破中雷管性能异常问题的研究

延期爆破中, 后爆装药中的雷管亦有可能因冲击作用而异常, 且因雷管的刚性结构, 这种异常现象不具备复原性, 从而成为煤矿发生爆破异常的另一诱因. 采用水下爆炸法测试煤矿许用毫秒延期电雷管在额定冲击压力作用下的异常情况, 旨在揭示国产煤矿毫秒延期雷管在冲击作用下的爆破异常特性. 并与炸药受压钝化特性相对比, 确定装药钝化的主要矛盾. 试验采用静、动态两种压力形式及裸管和包覆药卷管两种试验方式. 试样为 8 号煤矿许用毫秒延期电雷管 (2 ~ 5 段, 发蓝钢壳). 结果见表 4. 试验统计结果表明: 爆炸冲击波能够使煤矿延期雷管发生性能异常 (平均异常数超过 30%), 50% 异常压力介于 42 ~ 85 MPa 之间, 最低异常压力低至 7.88 MPa; 异常主要表现为: 秒量异常 (占 50% 以上, 包括速爆、串段、大于 130 ms 和一般异常)、拒爆、殉爆和管壳变形. 其中秒量异常占主导地位, 拒爆居其次, 殉爆和管壳变形相对较少; 延期雷管的抗冲击能力随段别的升高而下降; 装在药卷中的雷管, 借助于药卷的保护, 抗冲击能力有所上升, 但仍不能避免异常发生, 且总体异常表现形式趋同, 但秒量异常比率显著下降.

3 煤矿爆破异常的防治技术

煤矿爆破异常的防治可通过爆破参数的合理选择和耐压性产品的研制予以解决, 爆破参数的调整受到爆破作业方式的限制, 耐压性产品研制就成为防治的关键技术途径, 由于炸药与雷管相比, 炸药降敏的临界压力更低, 所以, 主要应研制耐压性乳化炸药.

表 4 雷管异常形式统计

Table 4 The statistics of detonator malfunction form

失常形式	2段		3段		4段		5段		占总失常	
	裸管 /个	包覆药卷 /个	/%							
殉爆	9		2		8	3	2	1	6.7	20
拒爆		4	14	2	22	1	16	3	33.9	50
管壳变形	17	2	2						1.1	
秒量异常		2	18	2	22	1	38	1	52.8	30
速爆	13		6	1	11		10	1	22.2	20
偏差大	1		5	1			21		15.0	5
串段	3		6		9	1	3		11.7	5
>130 ms			1		2		4		3.9	
失常比率	26/128	6/10	46/128	4/10	52/128	5/10	56/128	5/10	180/512	20/40

3.1 耐压型乳化炸药研制的关键技术途径分析

乳化炸药受压钝化机理表明：乳化炸药的乳状液结构、敏化气泡的动态稳定是耐压的技术关键；而根据乳状液稳定理论^[7]：乳状液中液滴破坏由连续相在液滴间排泄和界面膜破裂两步组成，它们与压力的关系为 $dh/dt = 2 Fh^3 / 3 A^2$ ，其中 h 为两界面膜之间的距离； t 为时间； F 为压力； η 为排泄液的黏度； A 为界面膜的面积。界面膜已破裂的洞孔扩张速度 dr/dt 与界面膜厚度 l 成反比关系，界面膜厚度 l 和乳化剂含量 C 成正比关系，即

$$dr/dt = (4 \gamma / l)^{1/2}, \quad l = C / A, \quad (1)$$

式中， r 为洞孔半径； γ 为界面张力； ρ 为界面膜的密度； ϕ 为相体积比。

式 (1) 表明，若乳化剂含量增加，界面膜厚度增加，将会有效遏止界面膜破裂洞孔的扩张速度。另外，界面膜强度则与乳化剂效能有关，形成 W/O 型乳状液时，需要表面活性剂分子链尾面积增加和油性增强，这样利于表面活性剂分子在界面上紧密排列并形成致密膜层。根据球形表面积公式，表面活性剂的充填系数与表面活性剂的分子长度和分散相粒子大小的关系为 $r = l / (\sqrt{c} - 1)$ ，其中 r 为分散相粒径； l 为表面活性剂层厚度； c 为充填系数。即界面膜厚度一定，若乳化剂效能增加，拥有相适应的充填系数，乳状液粒径就会保持在较理想状态。上述讨论表明，乳化炸药的自然贮存稳定和动压作用下保持乳状液结构稳定的关键技术途径基本相同，仅为基础和加强的关系，因此乳化剂的选择应兼顾粒子分散度和界面膜强度。实际运用中应注意避免乳化剂由于原料原因可能产生的“疏松”而使界面膜强度受损；或高分子乳化剂长链形成的脆性凝胶结构而不耐剪切。

3.2 耐压型乳化炸药配方设计

以我国典型煤矿许用乳化炸药为基础配方，通过使乳化剂复合 (Span - 80 与 PCE)，增加乳化剂含量，精细敏化工艺等技术途径，确定耐压型乳化炸药系列配方，测试结果达到了国标要求 (表 5, 6)。

表 5 耐压型乳化炸药系列配方

Table 5 Series formula of emulsion explosive with pressure-resisting capability

组 成	岩石型	二级煤矿	三级煤矿	组 成	岩石型	二级煤矿	三级煤矿
硝酸铵	74.7	65.45	63.65	复合乳化剂	3	3	3
硝酸钠	10	14	13	58号白石蜡	1	1	1
氯化钾	0	5	8	工业凡士林	1	1	1
尿 素	0	1	1	40号机械油	0.5	0.5	0.5
十二烷基硫酸钠	0	0.05	0.05	微晶蜡	0.8	0.8	0.8
水	10	8	8	发泡剂	0.2	0.2	0.2

表 6 耐压型煤矿许用乳化炸药综合性能测试结果

Table 6 Test results for emulsion explosives performance with pressure-resisting capability

项 目	标准要求	二级实测数据	三级实测数据	岩石实测数据	结果
可燃气安全度 /g	180 (400)	>180	>436	-	合格
有毒气体含量 /L · kg ⁻¹	80	22	22	23	合格
炸药密度 /g · cm ⁻³	1.00 ~ 1.30	1.15	1.16	1.18	合格
殉爆距离 /cm	2 (3)	[2] 3/3	[2] 3/3	[2] 3/3	合格
爆速 /m · s ⁻¹	抽样方案: 2/0, 1	不合格频数: 0/2	不合格频数: 0/2	不合格频数: 0/2	
	最小值: 3.0 ×10 ³	4.3 ×10 ³	4.1 ×10 ³	5.4 ×10 ³	合格
	平均值	4.3 ×10 ³	4.1 ×10 ³	5.4 ×10 ³	
猛度 /mm	抽样方案: 2/0, 1	不合格频数: 0/2	不合格频数: 0/2	不合格频数: 0/2	
	最小值: 10 (8, 12)	17.3	15.5	18.4	合格
	平均值	17.4	16.1	19.4	
做功能力 /mL	220 (210, 260)	278	246	294	合格
撞击感度 (爆炸概率) /%	8	0	0	0	合格
摩擦感度 (爆炸概率) /%	8	0	0	0	合格
热感度 (燃爆频数)	0/3	0/3	0/3	0/3	合格

4 结 论

我国煤矿爆破作业中存在爆破异常现象, 并易被忽略或掩盖。乳化炸药乳状液结构和敏化气泡的破坏是造成体系钝化的原因, 前者的破坏可能在时间上还要提前。延期雷管同样具有受压钝化现象, 主要表现为秒量异常、拒爆、殉爆和管壳变形。其中秒量异常占主导地位, 高段雷管更易遭受冲击破坏。装在药卷中的雷管, 抗冲击能力有所上升, 但仍不能避免异常发生。乳化炸药乳状液结构破坏的临界压力远小于雷管发生异常现象的临界压力, 且在实际爆破作业中, 雷管包覆在药卷内, 因此, 在工艺设计合理的情况下, 异常爆破更易被炸药引起。根据实验情况设计了耐压型乳化炸药配方, 并将成为煤矿爆破异常防治的重要措施。

参考文献:

- [1] Wieland M S. The relative sensitivity of permissible explosives to dynamic pressure desensitization [A]. Proc. 21st Intl Conf. Safety in Mines Research Inst [C]. Australia: Sydney, 1985. 21 ~ 25.
- [2] Mainiero R J, Verakis H C, Wieland M S. The relationship between hole spacing and misfires of permissible explosives [A]. Proc. of 2nd Mini-Symposium on Explosives and Blasting Research [C]. Atlanta, GA, Soc. of Explos. Eng., Monville, OH, 1986. 13 ~ 14, 16 ~ 27.
- [3] 弗莱彻 L R. 1978 ~ 1981 年美国矿山拒爆残留事故原因分析 [J]. 段鲁珍, 译. 炸药与爆破, 1987 (2): 24 ~ 30.
- [4] 吴英, 孟繁理, 李守臣. 爆破作业引起井下瓦斯和煤尘爆炸事故原因分析 [J]. 爆破, 1995 (2): 39 ~ 41.
- [5] Rustan P A. 保证安全爆轰的装药孔最小间距 [A]. 第四届国际岩石爆破破碎学术论文集 [C]. 贯荔, 译. 北京: 冶金工业出版社, 1995. 129 ~ 138.
- [6] 青木章哲, 安部隆幸, 田中满, 等. 含水炸药力学性质研究 (1 - 4 报) [J]. 张坤杰, 译. 炸药与爆破, 1988 (1): 18 ~ 36.
- [7] Becher P. Emulsion, theory and practice [M]. New York: Science Press, 1966.
- [8] Krishna Mohan V S, Field J E, Swallowe G M. High-speed photographic studies of impact on thin layers of emulsion explosive [J]. Propellants Explosives Pyrotechnics, 1984, 9 (2): 77 ~ 81.