

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.04.019

混装乳化炸药配方对炸药-岩石匹配效果影响研究*

赵明生^{1,2}, 黄胜松², 周建敏¹, 陶明³

(1. 保利新联爆破工程集团有限公司, 贵阳 550002; 2. 贵州大学, 贵阳 550002; 3. 中南大学, 长沙 41000)

摘要: 为解决某露天煤矿混装乳化炸药配方单一, 炸药性能不能根据不同地质条件及时调整, 使炸药性能与岩石匹配效果不佳, 导致炸药能量利用率不高、岩石爆破块度较大等问题。通过理论计算分析混装乳化炸药配方中不同组分含量对炸药的爆热、爆速、爆容的影响, 结合炸药的密度、爆速计算出炸药波阻抗, 结合现场试验, 采用 Split-Desktop 4.0 软件对岩石爆破岩石块度进行分析, 从而研究影响混装乳化炸药配方对炸药-岩石匹配效果的主要因素, 为混装乳化炸药配方的优化提供依据。结果表明: 硝酸铵含量从 75.0% 增加至 79.5%, 爆热值从 2708 kJ/kg 增加到 3082 kJ/kg; 爆速值从 4648 m/s 增加到 4997 m/s; 炸药波阻抗由 53.5 MN/m³·m/s 增加到 62.5 MN/m³·m/s; 爆容值 845 L/kg 下降到 821 L/kg。说明爆热、爆速、炸药波阻抗随着硝酸铵含量的提高而增大, 爆容随着硝酸铵含量增加而减少。为改善炸药与岩石匹配效果, 降低大块率, 根据 1228 平盘、1180 平盘不同的岩石性质, 设计了两组混装乳化炸药配方进行试验, 一组通过增加 10% 的硝酸铵含量提高炸药波阻抗, 另一组降低 20% 的硝酸铵含量, 提高炸药的爆生气体容积。经对爆破岩石块度分析, 配方调整后大块率降低了 6.5%~6.8%。

关键词: 炸药配方; 匹配效果; 爆破效果; 大块率

中图分类号: X936 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2021)04-0124-05

Study on Influence of Formula of Mixed Emulsion Explosive on Matching Effect of Explosive and Rock

ZHAO Ming-sheng^{1,2}, HUANG Sheng-song², ZHOU Jian-min¹, TAO Ming³

(1. Poly Xinlian Blasting Engineering Group Co., Ltd., Guiyang 550002, China;

2. Guizhou University, Guiyang 550002, China; 3. Central South University, Changsha 410000, China)

Abstract: There are some problems as single formula of mixed emulsion explosive, explosive performance cannot be adjusted timely according to different geological conditions existed in an open-pit coal mine, which lead to bad matching effect between the explosive performance and rock low explosive energy utilization rate and large rock blasting block degree. The influence of different components of mixed emulsion explosive formula on detonation heat, detonation speed and detonation capacity were analyzed. Furthermore, the wave impedance of the explosive was calculated by combining the density and detonation velocity of the explosive. Combined with the field test, the split-desktop 4.0 software was used to analyze the rock fragmentation of rock blasting, so as to study the main factors affecting the explosives-rock matching effect of the formula of mixed emulsion explosive, providing a basis for the optimization of the formula of mixed emulsion explosive. The results show that as the ammonium nitrate content increased from 75.0% to 79.5%, the explosive heat value increased from 2708 kJ/kg to 3082 kJ/kg, the detonation velocity increased from 4648 m/s to 4997 m/s, the explosive wave impedance increased from 53.5 MN/m³·m/s to 62.5 MN/m³·m/s, and the explosion capacity decreased from 845 L/kg to 821 L/kg. Besides, the detonation heat, detonation velocity and explosive wave impedance increase with the increase of ammonium nitrate content, and the detonation capacity decreases with the increase of ammonium nitrate content. In order to improve the matching effect

between explosive and rock and reduce the bulk rate, according to the different rock properties of 1228 flat and 1180 flat plates, two groups of mixed emulsion explosive formula are designed. One group increased the explosive wave impedance by increasing the ammonium nitrate content by 10%, and the other group reduced the ammonium nitrate content by 20% to increase the explosive gas volume of explosives. After the adjustment of the formula, the percentage of large rock was reduced by 6.5% ~ 6.8%.

Key words: explosive formulation; matching effect; blasting effect; large rate

现场混装乳化炸药具有生产工艺简单,在生产、运输、储存等环节均属于半成品,无雷管感度,安全可靠等优点,被广泛应用于各大型露天矿山爆破作业^[1]。研究混装乳化炸药配方与岩石合理性匹配关系,对改善爆破效果,提高炸药能量利用率,降低爆破成本显得尤为重要。炸药性能与岩石性质匹配主要有:波阻抗匹配、全过程匹配和能量匹配等^[2]。波阻抗匹配观点认为:炸药波阻抗和岩石弹性波阻抗相等时,炸药能量利用率最高,郭子如等人认为套用冲击波正入射波传统波阻抗理论忽略了后续爆炸气体的作用,同时应力波的传递过程过于简化^[3];全过程匹配则认为应将岩石、炸药和爆破设计参数纳入一个体系来研究考虑炸药与岩石相互作用全过程的能量传递关系;能量匹配的观点认为只要破碎岩石需要的能量和炸药产生的能量相近,就可以通过增减装药量以适应岩石的强度^[4,5]。赵明生、郑长青、叶海旺等引入神经网络方法,综合考虑岩石性质参数、爆破现场条件和爆破效果要求,提出了不同类型的基于神经网络的炸药性能参数和岩石匹配方法^[6-8]。在实际工程中,全过程匹配和能量匹配理论匹配方法难以应用,目前广泛使用的仍然是波阻抗匹配理论^[9]。

为研究混装乳化炸药不同配方对炸药-岩石匹配效果的影响,以新疆某露天煤矿现用混装乳化炸药配方为基础,通过理论分析出配方不同组分对炸药波阻抗的影响,找出影响炸药波阻抗的因素,并对炸药能量利用率进行计算。根据岩石地质条件及炸药能量利用率,设计出不同的炸药配方,使炸药-岩石匹配更加合理^[10],从而实现改善炸药性能、提高炸药能力利用率、优化提高爆破效果,降低企业生产成本的目。

1 混装乳化炸药配方组分对炸药波阻抗的影响分析

1.1 混装乳化炸药爆炸性能计算

混装乳化炸药主要由C、H、O、N元素组成,其爆炸性能参数主要有爆热、爆温、爆容、爆速、猛度等,其中爆热是炸药做功的能源,爆容是炸药对外做功的介质,其它爆炸参数如爆温、爆速、爆压都与爆热和爆容有关,因此,在进行配方设计时必须兼顾爆热和爆容两个最重要的化学参数。

1.1.1 爆热的理论计算

计算爆热前通过采用B-W规则确定炸药爆轰产物(B-W规则见表1),建立爆炸反应方程式,采用盖斯定律计算炸药的爆热。

表1 B-W规则
Table 1 B-W Rules

爆炸时各元素反应的先后顺序	反应方程式
H 氧化为 H ₂ O	2H + O = H ₂ O
C 氧化为 CO, 若氧不足则为固态 C	C + O → CO
O 有剩余将 CO 氧化为 CO ₂	CO + O → CO ₂
O 还有剩余则以 O ₂ 存在	O + O → O ₂
N 形成分子, 氧过剩, 生成氮的氧化物	N + N → N ₂

1.1.2 爆容的理论计算

爆容数值越大说明爆炸气体产物越多,做功效率越高。常用公式(1)计算爆容。

$$V = \frac{\sum n_j \times 1000}{\sum m_i Me_i} \times 22.4 \text{ (L/kg)} \quad (1)$$

式中:V为炸药的爆容; $\sum n_j$ 为气体爆轰产物总的摩尔数; m_i 为炸药*i*组分的摩尔数; Me_i 为炸药*i*组分的分子量。

1.1.3 爆速的理论计算

工程中常用爆轰流体动力学理论的近似理论方程估算炸药的爆速公式(2)

$$D = \sqrt{2(K^2 - 1)Q_0} \quad (2)$$

式中:D为爆速,m/s; Q_0 为理想爆热,kJ/kg; k 为爆轰产物局部等熵指数。

收稿日期:2021-10-13

作者简介:赵明生(1982-),男,研究员、博士研究生,主要从事爆破工程与安全技术研究,(E-mail)99113294@qq.com。

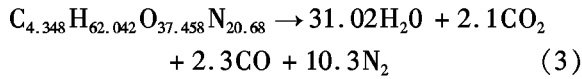
通讯作者:黄胜松(1991-),男,工程师、硕士研究生,主要从事炸药与安全技术研究,(E-mail)1042867695@qq.com。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52064003)

1.2 爆轰参数计算应用例

以新疆某露天煤矿现用炸药配方为例(见表2),分别计算爆热、爆容、爆速。取1 kg炸药为计算基准,并计算炸药中各组分物质的量(见表3)。

根据 B-W 规则,建立爆炸反应方程式



根据盖斯定律计算爆热时需炸药各组分的定容生成焓、爆轰产物的定容生成焓,见表4。

表2 现用混装乳化炸药配方

Table 2 Formula of mixed emulsion explosive used now

水相配方		油相配方	
硝酸铵/‰	水/‰	乳化剂/‰	油/‰
780	160	12	48

表3 炸药中各组分物质的量

Table 3 Quantities of each component of explosive

物质名称	物质的量/mol	1 kg 炸药中各元素物质的量/mol			
		C	H	O	N
硝酸铵	10.34	0	41.36	31.02	20.68
水	6.27	0	12.54	6.27	0
柴油	0.16	2.88	5.12	0	0
机油	0.071	0.852	1.846	0	0
乳化剂	0.028	0.616	1.176	0.168	0
1 kg 炸药中各原子物质的量		4.348	62.042	37.458	20.68

表4 各物质定容生成焓

Table 4 Enthalpy of formation at constant volume of each substance

物质名称	标准摩尔焓/(KJ·mol ⁻¹)	物质的量/mol	定容生成焓/kJ
硝酸铵	353.46	10.340	3654.77640
水(液态)	281.86	6.270	1767.26220
柴油	661.55	0.160	105.84800
机油	392.88	0.071	27.89448
乳化剂	1470.68	0.028	41.17904
水(气态)	240.35	31.021	7455.89735
一氧化碳	111.69	2.259	252.30771
二氧化碳	393.13	2.089	821.24857

该配方的爆炸性计算结果见表5。

表5 爆炸性能计算结果

Table 5 Results of explosive performance calculations

爆热/(kJ·kg ⁻¹)	爆容/(L·kg ⁻¹)	爆速/(m·s ⁻¹)
2932	1023	4860

1.3 不同组分含量对炸药性能及波阻抗的影响

根据波阻抗理论,炸药波阻抗是炸药密度与爆速的乘积。根据工程实际情况混装乳化炸药密度通常控制在1.15~1.25 g/cm³之间。不同配方炸药的爆速通过计算得出。为找出不同配方对炸药波阻抗的影响,共设计10组不同含量组分的配方(油相材料组分含量保持不变),并计算出相应的爆轰参数和炸药波阻抗。见表6。

表6 不同组分含量的爆炸性能及波阻抗的影响

Table 6 Explosive properties of different components and the influence of wave impedance

序号	硝酸铵	水	爆热	爆容	爆速	炸药波阻抗
1	795	145	3082	821	4997	57.5~62.5
2	790	150	3006	817	4928	56.7~61.6
3	785	155	2931	814	4859	55.9~60.7
4	780	160	2932	824	4860	55.8~60.3
5	775	165	2893	827	4824	55.6~60.2
6	770	170	2856	831	4789	55.1~59.9
7	765	175	2821	834	4756	54.7~59.5
8	760	180	2784	838	4720	54.3~59.0
9	755	185	2747	841	4686	53.9~58.6
10	750	190	2708	845	4648	53.5~58.1

从表6可以看出,炸药组分中硝酸铵含量与爆热、爆速、炸药波阻抗成正相关。随着硝酸铵含量增加爆速、爆热、波阻抗均增加,反之则减少;随着硝酸铵含量增加爆容减少,反之增加。

2 工程应用

2.1 工程概况

矿田位于科克塞尔克山与纸房盆地的交接处,地形总体趋势北高南低、东高西低,地貌形态为残丘

状剥蚀平原,地层主要由第四系松散岩类、侏罗系沉积碎屑岩类组成,沉积碎屑岩的各类岩石,其单层厚度沿走向方向的变化较大,可由数厘米变化到数米,尤其以砂岩最为明显,沿走向、倾向变化极大。在1228平盘、1180平盘均多次出现大块的情况。

2.2 实验数据分析

为研究该平盘岩石性质,分别对1228平盘、1180平盘的岩石取样进行岩石力学实验并对岩体进行声波检测计算出岩石波阻抗,见表7、表8。

表7 岩石力学参数表

Table 7 Rock mechanics parameters table

位置	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	单轴抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
1228平盘	2563	42.50	6.23	35.1	0.25
1180平盘	2541	46.00	5.82	34.2	0.24

表8 不同平盘岩石波阻抗

Table 8 Wave impedance of different flat disk rock

位置	岩石密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	纵波速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	岩石波阻抗/ ($\text{MN}/\text{m}^3 \cdot \text{m}/\text{s}$)	炸药波阻抗/ ($\text{MN}/\text{m}^3 \cdot \text{m}/\text{s}$)
1228平盘	2.563	3670	94.0	35.0
1180平盘	2.485	3050	75.8	

根据文献[4]可知炸药岩石波阻抗匹配存在比较好的匹配范围为0.8~1.7。表8可以计算出1180平盘、1228平盘岩石炸药匹配系数分别为2.17和2.69。1180和1228平盘上易出现爆破大块主要原因是炸药能量与岩石阻抗匹配不合理导致。见图1。

2.3 不同配方的选择

不同岩石阻抗不同,破坏时所需应力波峰值不同。对高阻抗岩石,岩石的破坏主要取决于应力波(包括入射波和反射波),应选用爆压和爆速都较高的炸药;对阻抗岩石,岩石的破坏主要是入射应力波和爆生气体共同作用的效果,宜爆压、爆速适中的

炸药;对于低阻抗岩石,岩石的破坏主要以爆生气体破坏为主,适合选择爆热高的炸药。不同岩石推荐选用炸药见表9。

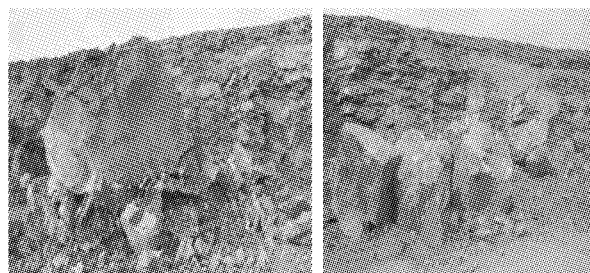


图1 平盘大块

Fig. 1 Flat disk block

表9 不同岩石推荐选用的炸药性能

Table 9 Exploite properties recommended for different rocks

坚固系数 f	岩石性质		炸药性能	
	波阻抗/($10^5 \text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	抗压强度/MPa	爆速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	波阻抗/($10^5 \text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
14~20	160~200	140~200	6300	75.6~88.2
9~14	140~160	90~140	5600	67.2~78.4
5~9	100~140	50~90	4800	48.0~57.6
3~5	80~100	30~50	4000	40.0~48.0
1~3	40~80	10~30	3000	30.0~36.0
0.5~1	20~40	5~10	2500	20.0~25.0

从表 8、9 可以看出,1228 平盘适合用爆速为 4000 m/s 的炸药;1180 平盘适合用爆速为 3000 m/s 的炸药。考虑到现用配方实际检测爆速与理论爆速比值为 72.9%,经换算 1228 平盘所需炸药理论爆

速为 5400 m/s;同理 1180 平盘所需炸药理论爆速为 4100 m/s。根据表 5 的理论计算在现有配方的基础上对配方组分进行刷选优化。优化后的配方见表 10。

表 10 优化后的混装乳化炸药配方

Table 10 Optimised formula for mixed and emulsified explosives

平盘位置	硝酸铵/%	水/%	乳化剂/%	油/%	实际爆速/(m·s ⁻¹)
1228	790	150	12	48	4150
1180	770	170	12	48	3200

2.4 应用效果

爆破后岩石块度作为爆破效果好坏的评价指

标,采用 Split-Desktop4.0 软件对矿区爆堆岩石块度进行统计分析,见表 11。

表 11 数据统计分析

Table 11 Statistical analysis of data

名称	各种岩石块度占比/%				
	<70 cm	<90 cm	<120 cm	<150 cm	大块率
1228	61.00	80.25	83.95	87.8	12.2
1180	63.52	82.64	84.36	88.1	11.9
原配方	65.33	75.26	78.69	81.3	18.7

从表 11 可以看出,对比原配方的爆破效果,优化后的配方大块率从 18.7% 分别降至 11.9%,12.2%。同时炸药单耗还略有下降,表明可通过调整混装乳化炸药组分含量的方式调整炸药与岩石匹配系数,使其匹配更加合理。见图 2。

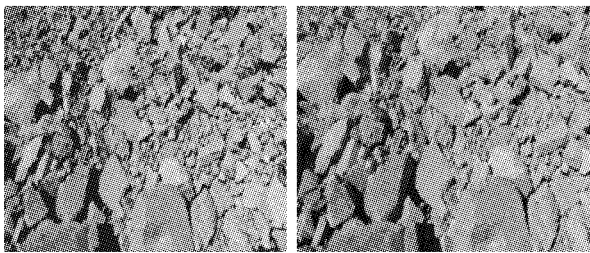


图 2 块度分析

Fig. 2 For block degree analysis

3 结论

通过理论计算,分析了混装乳化炸药配方中各组分含量对爆炸性能及炸药波阻抗的影响。结果表明,爆热、爆速、炸药波阻抗均随硝酸铵含量的增加而增大;爆容随着硝酸铵含量的降低而减少,反之则增大。通过设计硝酸铵含量分别为 75%、78% 的炸药配方进行现场爆破,其爆破块度岩石大块率降低了 6.5%~6.8%。说明通过调整炸药组分中硝酸铵含量可改变炸药阻抗及爆轰参数,使炸药性能可根据不同岩石性质进行调整,实现炸药匹

配的多样化。

参考文献 (References)

- [1] 卢军,马元军. 现场混装乳化炸药爆破破岩机理分析及其工程应用[J]. 矿业工程研究,2020,35(4):1-5.
- [1] LU J,MA Y J. Analysis of blasting mechanism of site mixed emulsion explosive and its engineering application[J]. Mining Engineering Research,2020,35(4):1-5. (in Chinese)
- [2] 冷振东,卢文波,严鹏,等. 基于粉碎区控制的钻孔爆破岩石-炸药匹配方法[J]. 中国工程科学,2014,16(11):28-35,47.
- [2] LENG Z D,LU W B,YAN P,et al. Drilling blasting rock-dynamite matching method based on crush zone control [J]. Chinese Engineering Science,2014,16(11):28-35,47. (in Chinese)
- [3] 郭子庭,吴从师. 炸药与岩石的全过程匹配[J]. 矿冶工程,1993(3):11-15.
- [3] GUO Z T,WU C S. The explosives matches the whole process of the rock [J]. Mining and Metallurgical Engineering,1993(3):11-15. (in Chinese)
- [4] 冷振东. 岩石爆破中爆炸能量的释放与传输机制[D]. 武汉:武汉大学,2017.
- [4] LENG Z D. Release and transmission mechanism of explosive energy in rock blasting[D]. Wuhan:Wuhan University,2017. (in Chinese)