

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2021.05.006

# 乳化炸药的高原环境适应性研究<sup>\*</sup>

吴红波 高郁凯 李 鹏 张 续

安徽理工大学化学工程学院(安徽淮南,232001)

[摘 要] 通过模拟高原环境,研究温度与气压的变化对乳化炸药爆速、猛度的影响,并通过显微镜观察乳化炸药的微观结构,研究其性能改变的原因,以利于指导高原地区乳化炸药的使用以及爆破参数的设计。实验结果表明:若温度为 0℃不变时,海拔不超过 2 500 m,乳化炸药的性能基本保持不变;海拔为 2 500 m 以上时,乳化炸药性能会迅速降低。而若温度随着海拔高度的增加而降低时,乳化炸药的爆速、猛度会迅速降低。在海拔为 2 500~3 500 m 时,化学敏化的乳化炸药敏化气泡开始转变为无效气泡。

[关键词] 高原环境;乳化炸药;爆速;猛度

[分类号] TQ560.72

## Study on Adaptability of Emulsion Explosive in Plateau Environment

WU Hongbo, GAO Yukai, LI Peng, ZHANG Xu

School of Chemical Engineering, Anhui University of Technology (Anhui Huainan, 2320001)

[ABSTRACT] Influences of temperature and air pressure changes on detonation velocity and brisance of emulsion explosive were studied under the condition of simulating plateau environment, and microstructure of emulsion explosive was observed by microscopic method to explore the reasons for its performance changes. It was helpful to guide the use of emulsion explosive and the design of blasting parameters in plateau area. Experimental results show that the performances of emulsion explosive remain basically unchanged when the temperature remains unchanged at 0℃ and the altitude is 2 500 m or below, while they will decrease rapidly when the altitude is above 2 500 m. However, if the temperature decreases with the increase of altitude, detonation velocity and brisance of emulsion explosive will decrease rapidly. When the altitude is between 2 500 m and 3 500 m, sensitized bubbles of chemically sensitized emulsion explosive begin to transform into ineffective bubbles.

[KEYWORDS] plateau environment; emulsion explosive; detonation velocity; brisance

## 引言

乳化炸药是一种油包水型工业炸药,能应用于多种复杂的环境之中,有良好的爆炸性能和安全性,目前仍是矿山开采、隧道开挖等工程中使用最为广泛的一类炸药<sup>[1]</sup>。随着国民经济的发展,资源的开采重心慢慢倾向于我国新疆、西藏等西部地区,在这些地区使用乳化炸药也越来越频繁<sup>[2-3]</sup>。而这些地区皆为高原、高海拔地区,在使用过程中,乳化炸药往往会出现爆速下降、半爆或拒爆等现象,存在爆破后岩石块度大、爆破施工效率低下等问题。目前,对于高海拔地区乳化炸药性能的研究相对较少。赵晓

莉等<sup>[4]</sup>模拟了高原环境对炸药爆速的影响得出,由于生产工艺不同,海拔高度的增加对粉状乳化炸药和乳化炸药性能的影响程度不同。李志敏等<sup>[5]</sup>研究了负压环境对炸药爆炸冲击波的影响得出,在近真空环境下,爆炸冲击波主要以爆轰产物作为传播介质,波速提高受限于爆轰产物运动速度,强度弱,衰减迅速,冲击波超压随爆炸环境负压的降低而降低。高玉刚等<sup>[6]</sup>研究了高海拔环境下压力对炸药猛度的影响,得出膨化炸药的猛度随海拔高度的增加基本不发生变化。目前,对于高原环境中乳化炸药的性能研究主要探讨了其受环境压力的影响。而在实际使用过程中,乳化炸药不仅受大气压力影响,也受环境温度以及时间的影响。

<sup>\*</sup> 收稿日期:2021-04-13

基金项目:安徽省高校自然科学研究项目(KJ2019A0121)

第一作者:吴红波(1975-),男,副教授,研究方向为爆炸安全、爆破器材及爆炸测试技术。E-mail:hbwu@ aust. edu. cn

本文中,模拟不同温度、不同气压下乳化炸药的性能变化,使其更接近于实际使用过程中的环境条件,研究乳化炸药在高海拔地区使用时发生爆轰性能下降、半爆或拒爆现象的原因,拟提高爆破的安全性以及爆破施工的效率。

1 实验部分

1.1 实验材料及仪器

实验材料:2#岩石乳化炸药,淮南舜泰化工有限责任公司,直径为 32 mm。

实验仪器:真空泵;BSW-3A 型智能五段爆速仪,湖南湘西州奇搏矿山仪器厂;JA30003B 电子天平,上海越平科学仪器有限公司;XSP-86 系列无限远生物显微镜,上海田瞳光学科技有限责任公司;KHSB 可程式高低温试验箱,合肥安科环境试验设备有限公司。

1.2 高原环境的温度、压力的确定

查阅 2 500 m 以下的海拔与气压关系的相关文献<sup>[7-8]</sup>,利用 Origin 对文献中的数据进行拟合,可以得到以海拔为  $x$ 、大气压力为  $y$  的线性方程

$$y = -10.547x + 100\,756. \tag{1}$$

由其扩展,可得到海拔为 3 500、4 500 m 的气压。海拔每上升 100 m,温度下降 0.6 ℃,确定不同海拔处的温度<sup>[9]</sup>。参考新疆、西藏等高海拔地区的冬季平均温度,若取海拔为 0 m 时,温度为 0 ℃,不同海拔条件下气压和温度如表 1 所示。

1.3 炸药爆炸性能的测试

将乳化炸药静置于压力容器中,根据表 1 中提供的气压,用真空泵抽取至模拟气压并静置 12 h,随后按照表 1 中的温度,放置于高低温循环试验箱 12 h,取出乳化炸药。根据 GB/T 13228—2015《工业炸药爆速测定方法》测量其爆速<sup>[10]</sup>;根据 GB 12440—

表 1 不同海拔条件下的气压和温度  
Tab.1 Pressure and temperature at different altitudes

海拔/m	气压/Pa	温度/℃
0	101 300	0
500	96 000	-3
1 500	85 400	-9
2 500	74 800	-15
3 500	64 200	-21
4 500	53 600	-27

1990《炸药猛度试验 铅柱压缩法》测量其猛度。

2 结果及分析

2.1 不同海拔和不同温度

在不同的海拔和温度下测试乳化炸药的爆速和猛度,如表 2、表 3 所示。

由表 2 及表 3 可知,温度随着海拔高度的升高而降低。表 2 中:在海拔 500 m 及以下时,乳化炸药的爆速变化不大;在海拔1 500m及以上时,爆速迅速降低。从表3可知,乳化炸药的猛度随着海拔高

表 2 不同高原环境下乳化炸药的爆速

Tab.2 Detonation velocity of emulsion explosives in different plateau environments

海拔/ m	温度/ ℃	$v_1$ / ( m · s <sup>-1</sup> )	$v_2$ / ( m · s <sup>-1</sup> )	$\bar{v}$ / ( m · s <sup>-1</sup> )
0	0	4 316	4 244	4 280
500	-3	4 153	4 056	4 015
1 500	-9	3 828	3 762	3 795
2 500	-15	3 504	3 494	3 499
3 500	-21	3 351	3 294	3 323
4 500	-27	3 017	2 912	2 964

表 3 不同高原环境下乳化炸药的猛度

Tab.3 Brisance of emulsion explosives in different plateau environments

海拔/ m	环境温度/ ℃	$h_0$		$h_1$		$\Delta h$		$\Delta \bar{h}$
		1#	2#	1#	2#	1#	2#	
0	0	60.00	60.02	46.32	46.66	13.68	13.36	13.52
500	-3	59.98	59.99	46.97	46.88	13.01	13.11	13.06
1 500	-9	60.01	60.00	47.19	47.21	12.82	12.79	12.81
2 500	-15	60.02	60.02	47.86	48.03	12.16	11.99	12.08
3 500	-21	59.98	60.00	49.18	49.08	10.80	10.92	10.86
4 500	-27	60.00	59.99	51.23	51.07	8.77	8.92	8.85

度的升高而降低。与爆速相似的是:在海拔 500 m 以下时,乳化炸药的猛度并没有太大的变化;海拔 1 500 m 及以上时,随着海拔高度的逐渐升高,猛度明显降低。在海拔 3 500 m、温度为 -21 ℃ 时,乳化炸药的猛度下降明显,相对于 2 500 m、-15 ℃ 时性能有了较大的下降,即在 2 500 ~ 3 500 m 之间乳化炸药猛度性能有较为明显的降低过程。

另外,实验还发现,随着海拔的升高、温度的降低,乳化炸药爆炸后炮烟的生成量明显增加,这表明随着海拔的增加、气压和温度的降低,乳化炸药出现不完全爆轰现象。

2.2 不同海拔和同一温度

为了进一步研究乳化炸药性能降低的原因,在同一温度(0 ℃)、不同海拔对应气压下,将乳化炸药静置 12h 后进行爆速以及猛度测试。结果见表 4、表 5。

表 4 0 ℃ 时不同气压下乳化炸药的爆速  
Tab. 4 Detonation velocity of emulsion explosives under different pressures at 0 ℃

海拔 /m	气压/ Pa	$v_1$ / ( m · s <sup>-1</sup> )	$v_2$ / ( m · s <sup>-1</sup> )	$\bar{v}$ / ( m · s <sup>-1</sup> )
0	101 300	4 316	4 244	4 280
500	96 000	4 251	4 169	4 210
1 500	85 400	4 219	4 156	4 188
2 500	74 800	4 018	4 106	4 062
3 500	64 200	3 726	3 825	3 775
4 500	53 600	3 452	3 566	3 509

由表 4 可知:环境温度恒定为 0 ℃,在海拔 2 500 m 及以下,随着海拔的升高,乳化炸药爆速下降并不明显;在海拔 2 500 ~ 3 500 m 时才有了较为明显的下降。与海拔为 4 500 m、温度为 -27 ℃、乳化炸药爆速为 2 964 m/s 相比,环境温度 0 ℃、海拔高度 4 500 m 时,乳化炸药的爆速为 3 509 m/s,仍大

于 GB 18095—2000《乳化炸药》中 2# 岩石乳化炸药的爆速。因此,乳化炸药在高原爆破中出现使用效率低下、单耗高、半爆或者拒爆,是由于低温和负压共同作用,使其爆炸性能达不到国家标准。2# 岩石乳化炸药的爆速随温度变化关系如图 1 所示。可以看出,在海拔高度为 2 500 m 以下时,变温爆速下降速率明显高于恒温爆速下降速率。因此,海拔在 2 500 m 以下时,温度的改变是乳化炸药爆速发生变化的主要因素。

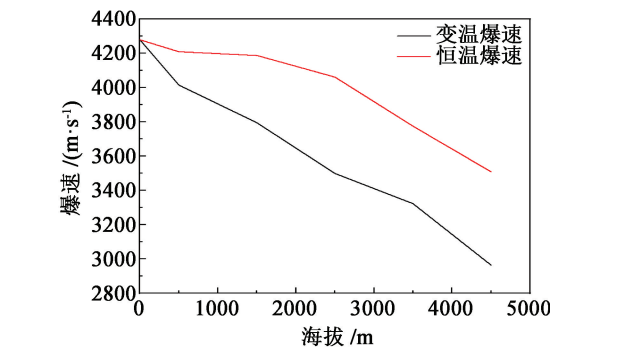


图 1 乳化炸药在同一大气压、不同温度下的爆速曲线  
Fig. 1 Detonation velocity of emulsion explosives under the same pressure at different temperatures

由表 5 可以看出:海拔高于 2 500 m 时,乳化炸药的猛度迅速下降;在环境温度不变时,其猛度随着海拔下降的速率明显低于不同温度下乳化炸药猛度的下降速率。

2.3 乳化炸药的微观结构分析

为研究乳化炸药爆轰性能变化的原因,采用 XSP-86 系列无限远生物显微镜观察温度与气压共同作用下乳化炸药的微观结构,放大倍率为 100 倍。

通常认为乳化炸药中气泡直径为 100 μm 以下为有效气泡,能形成爆炸所需的热点<sup>[11]</sup>。从图 2(a) 中可以看出,在海拔为 0 m、环境温度为 0 ℃ 时,乳化炸药里包含许多规则小气泡,最大气泡直径为

表 5 0 ℃ 时不同海拔高度下乳化炸药的猛度  
Tab. 5 Brisance of emulsion explosives under different altitudes at 0 ℃

							mm
海拔/m	$h_0$		$h_1$		$\triangle h$		$\triangle \bar{h}$
	1 <sup>#</sup>	2 <sup>#</sup>	1 <sup>#</sup>	2 <sup>#</sup>	1 <sup>#</sup>	2 <sup>#</sup>	
0	60.00	60.02	46.32	46.66	13.68	13.36	13.52
500	60.01	60.00	46.62	46.47	13.39	13.53	13.46
1 500	59.98	60.01	46.73	46.65	13.25	13.36	13.31
2 500	60.02	60.01	47.13	46.97	12.89	13.04	12.97
3 500	60.00	59.99	47.98	48.05	12.02	11.94	11.98
4 500	60.03	60.00	49.20	48.99	10.83	11.01	10.92

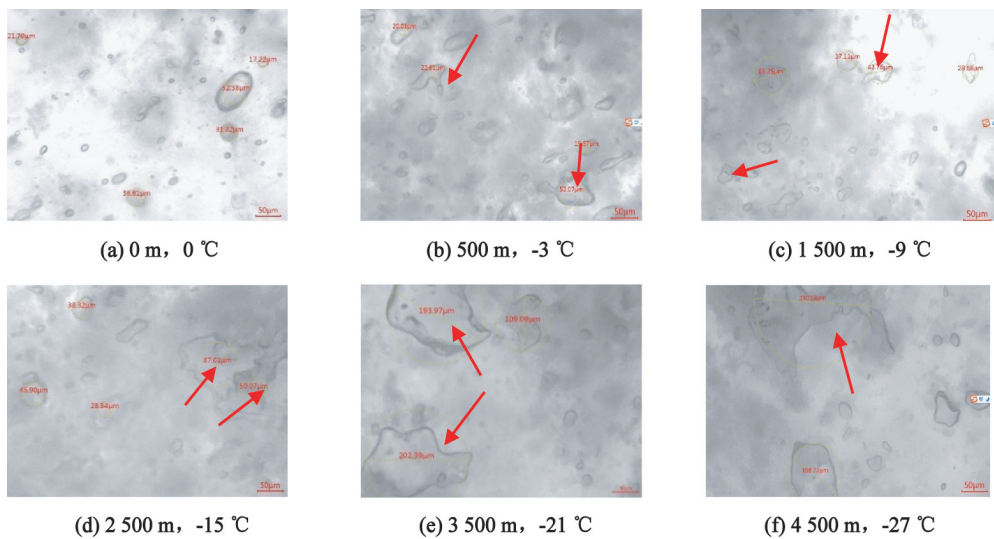


图 2 不同高原环境下乳化炸药的微观结构  
Fig.2 Microstructure images of emulsion explosives in different plateau environments

52.38 μm。图 2(b)海拔为 500 m 时,有效气泡数目变化不大,形状相对于 0 m、0 °C 时仍较为规则,但可以看出乳化炸药中的小气泡已经开始产生聚集的趋势。当海拔为 1 500 m 时,图 2(c)中气泡的直径普遍增加,数量开始减少,但气泡直径仍在 100 μm 以下。当海拔为 2 500 m 时,从图 2(d)中可以看出,气泡直径明显增加,气泡数量有所减少。当海拔从 2 500 m 到 3 500 m 时,这一过程是气泡最大直径从 87 μm 转变为 100 μm 以上的过程,气泡的数目减少,这种减少在一定程度上会导致炸药内的热点减少,化学反应速率降低,爆轰反应区增长,最终使得爆炸性能降低。从图 2(e)和图 2(f)可以看出,由于气泡强烈的聚集作用,气泡相对于低海拔高原环境时呈完全不规则状,小气泡数量明显减少,乳化炸药表面部分区域产生了因气泡逃逸而出现的空洞,最大气泡直径已远远大于 100 μm,相同大小区域的热点数目急剧减少,爆速与猛度急剧下降。因此,当海拔超过 2 500 m 时,化学敏化的乳化炸药便有了一定的局限性,物理敏化的乳化炸药或表现更好。

究其本质,随着海拔高度的增加,气压的降低会导致乳化炸药内的敏化气泡所承受的气压逐渐减小,使得气泡直径增加,气泡破裂、聚集、逃逸、敏化气泡数量减少,波后反应化学区的反应宽度增加;同时,在低压作用下,乳化炸药的密度逐渐降低,导致爆炸时能量不集中,爆炸性能降低,且冲击波超压随爆炸环境气压的降低而降低,导致其做功能力随着海拔升高而降低。由于本次实验中所用乳化炸药的水相析晶点为 65 °C,随着海拔升高,环境温度与水

相析晶点温差逐渐增大,使得乳化炸药的稳定性降低,乳化炸药的水相析晶将会愈发严重,导致油相与水相之间接触面减少,不利于反应进行。并且由于炸药本身温度较低,会使炸药达到反应温度所需的能量加大,爆炸时能量释放速度变慢。最终,在一定的低温、低压共同作用下,乳化炸药的性能有了明显的降低。

3 结论

利用 2#岩石乳化炸药进行实验,对不同海拔下的气压以及温度进行模拟,分别对乳化炸药的爆速、猛度、微观结构进行实验研究,得出以下结论:

- 1) 若环境温度为 0 °C 不变,海拔高度不超过 2 500 m 时,乳化炸药的爆速、猛度性能基本无变化;海拔为 2 500 ~ 3 500 m 时,乳化炸药性能会急剧下降。
- 2) 当环境温度随着海拔的增加而降低时,乳化炸药的爆速、猛度迅速降低,海拔在 2 500 m 以下时,温度是影响乳化炸药性能的主要因素。
- 3) 随着海拔的增加,乳化炸药内部气泡聚集、逃逸的现象将会越发严重。海拔为 2 500 ~ 3 500 m 时,化学敏化的乳化炸药敏化气泡开始转变为无效气泡。

参 考 文 献

[1] 汪旭光. 乳化炸药[M]. 2 版. 北京:冶金工业出版社,

