

文章编号: 1001-1749(2023)02-0138-08

环保乳化炸药在南方复杂山地地震勘探中的适应性研究

李苏光, 王静波, 蒋福友
(中国石化勘探分公司, 成都 610041)

摘要: 高密度炸药是南方山地地震数据采集井炮激发的主流震源, 高密度炸药的组分构成和属性特征在生产中存在较大的安全环保隐患, 这有悖于绿色安全勘探理念。探索环保乳化炸药震源在南方山地地震勘探中的适应性, 推动南方山地地震勘探向安全环保的理念转变势在必行。这里系统地分析了大量的生产试验数据, 探讨了环保乳化炸药在南方山地碳酸盐岩出露区、泥页岩出露区, 以及砂岩出露区的适应性及其替代高密度炸药的可行性, 为后续环保乳化炸药在南方山地勘探中大规模推广应用提供借鉴。

关键词: 高密度炸药; 乳化炸药; 南方山地; 安全环保; 地震勘探; 炸药震源

中图分类号: P 631.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2023.02.02

0 引言

随着对油气勘探安全环保要求越来越高^[1], 野外地震数据采集向生态环保方向发展是大势所趋。炸药是目前南方山地地震数据采集激发地震波的主要震源, 井内埋置铰梯型高密度炸药激发地震波是山地采集常用的技术手段^[2]。高密度炸药震源爆温高, 释放气体多, 有利于提高激发能量, 但其爆炸后易产生有害氮氧化物, 对地下水及土壤污染较大^[3], 且高密度炸药保质期一般较长, 基本为2年—3年^[4]。实践表明, 即使过了保质期仍有较高的引爆率, 无形中增加了盲哑炮处理不完全的危险性和严重性, 增加了安全生产风险。环保型乳化炸药主要由硝酸铵、硝酸钠、碳氢化合物、乳化剂等组分构成, 爆炸后不产生有害气体。相比高密度炸药, 乳化炸

药是一种低爆速炸药, 其保质期较短, 一般为半年^[5]。试验表明, 过期后引爆成功率很低, 可明显降低盲哑炮处理的后顾之忧, 与安全环保的勘探理念相吻合。为适应绿色安全勘探这一发展趋势, 笔者通过一系列探索性试验数据分析, 探讨了环保型乳化炸药在南方山地不同激发岩性区开展地震采集的适应性和可行性, 为后续在南方山地的推广应用提供依据。

1 炸药激发地震波基本理论

根据爆炸动力学中动量守恒定理可知, 在围岩介质中, 作用于介质上的冲量 I 与介质受到扰动的动量变化相等, 爆炸冲量计算公式为式(1)^[6]。

$$I = [(p_0 + d_p) - p_0] \cdot A \cdot \Delta t = (x - x_1) \cdot A \cdot (\rho_0 + d_p)(u - o) \quad (1)$$

收稿日期: 2021-11-25

基金项目: 中国石油化工股份有限公司独立课题(P20007)

第一作者: 李苏光(1983—), 男, 本科, 工程师, 主要从事石油地球物理勘探工作, E-mail: lisuguang03@163.com。

式中: u 为扰动速度; o 为初始扰动速度; p_0 为初始(在 x_1 位置)压强; $(p_0 + d_p)$ 为扰动后(在 x 位置)的压强; A 为扰动介质的截面积; $(x - x_1)$ 和 Δt 分别表示扰动传播的距离和所用的时间; ρ_0 为介质的初始密度; d_p 为密度变化量。由式(1)可知, 如果减小冲击波加载的速度, 而使作用的时间 Δt 延长, 则冲量 I 值同样也会增加。冲量归根结底也是一种作用在介质上的力, 在介质弹性形变范围内, 随着力的增加, 介质的形变量也会随之增大, 这也可以提高炸药做有效功的能力。

高密度炸药爆温高, 释放气体多, 有利于提高激发能量, 其化学反应时间短, 爆速高(约 5 800 m/s), 产生的应力波频率相对较高; 乳化炸药相比高密度炸药是一种低爆速炸药(约 5 200 m/s), 产生的应力波频率相对较低^[7-8], 爆炸能量也相对较低。由式(1)可知, 可通过增加乳化炸药药量, 延长作用时间来增加爆能, 达到既增加激发的低频分量(延长作用时间)又增加激发能量的目的, 这对于在诸如碳酸盐岩等刚性岩性区激发较为有利。

2 高密度炸药与乳化炸药属性分析

行业内通常把炸药和岩石的阻抗近似相等作为炸药和岩性阻抗耦合的依据, 这样才有利于提高弹性地震波能量^[8]。目前在南方山地生产中常用的激发效果较好的高密度炸药平均阻抗为 8.12 kg/s · m² ~ 9.28 kg/s · m², 而乳化炸药平均阻抗为 5.46 kg/s · m² ~ 6.5 kg/s · m², 南方山地砂岩平均阻抗为 6.00 kg/s · m² ~ 8.80 kg/s · m², 砂岩介质

阻抗与高密度炸药阻抗的比值在 0.73~0.94 之间, 乳化炸药与砂岩介质阻抗的比值在 0.73~0.91 之间, 两种药型与砂岩介质的比值近似, 按照阻抗匹配理论, 乳化炸药可以替代高密度炸药开展生产。但乳化炸药与碳酸盐岩介质的阻抗差异就非常明显, 如三叠系碳酸盐岩介质平均阻抗为 8.75 kg/s · m² ~ 13 kg/s · m², 接近乳化炸药的 2 倍, 明显与高密度炸药阻抗更接近; 二叠系及以下地层碳酸盐岩介质平均阻抗为 11.7 kg/s · m² ~ 16.8 kg/s · m², 是乳化炸药的 2 倍~2.5 倍, 是高密度炸药阻抗的 1 倍~2 倍(表 1)。由表 1 可知, 相比于高密度炸药, 乳化炸药与碳酸盐岩介质差异更大, 更难以满足阻抗匹配理论。根据爆炸动力学冲量守恒定理可知, 若使乳化炸药达到高密度炸药相似的激发能量, 可采用增加药量延长作用时间的方式实现, 确定最佳激发药量, 需开展系统的试验研究。

3 不同药型激发效果分析

针对奥陶系碳酸盐岩介质, 对比 8 kg 乳化炸药与 8 kg 高密度炸药试验单炮, 单炮信噪比整体相似, 高密度炸药单炮面波略重; 能量定量分析表明, 乳化炸药单炮各频段能量均比高密度炸药单炮能量弱, 总能量仅为高密炸药单炮能量的 73.16%, 线性干扰波和散射干扰波均比较发育(图 1)。当把乳化炸药增加 2 kg 后, 即采用 10 kg 乳化炸药激发能够达到 8 kg 高密度炸药激发单炮能量的 98.31%, 单炮记录信噪比相似(图 2)。

表 1 不同类型炸药型能参数

Tab. 1 Energy parameters of different types of explosives

药型	高密度	乳化	TNT	黑索金	砂岩	三叠系灰岩	二叠系及以下地层灰岩
密度/g · cm ⁻³	1.4~1.6	1.05~1.25	1.64	1.77	2.00~2.20	2.5~2.6	2.6~2.8
爆速(速度)/m · s ⁻¹	5800	5200	6900	8600	3000~4000	3500~5000	4500~6000
阻抗/ g · cm ⁻³ · km · s ⁻¹	8.12~9.28	5.46~6.5	11.3	15.22	6~8.8	8.75~13	11.7~16.8
平均阻抗/ g · cm ⁻³ · km · s ⁻¹	8.7	5.98	11.3	15.22	7.4	10.875	14.25

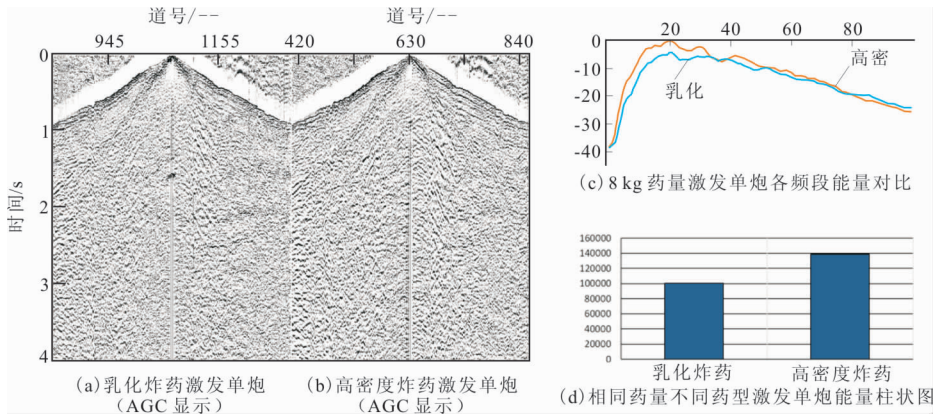


图 1 奥陶系碳酸盐岩介质 8 kg 乳化炸药和 8 kg 高密度炸药单炮及其能量定量分析
 Fig.1 Ordovician carbonate medium, the single shot seismic data and its energy Quantitative analysis of 8 kg emulsion explosive and 8 kg high density explosive

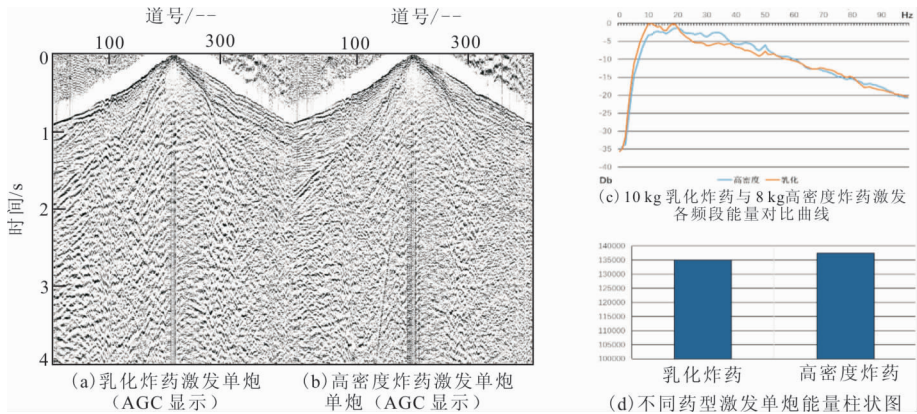


图 2 奥陶系碳酸盐岩介质 10 kg 乳化炸药和 8 kg 高密度炸药单炮及其能量定量分析
 Fig.2 Ordovician carbonate medium, the single shot seismic data and its energy Quantitative analysis of 10 kg emulsion explosive and 8 kg high density explosive

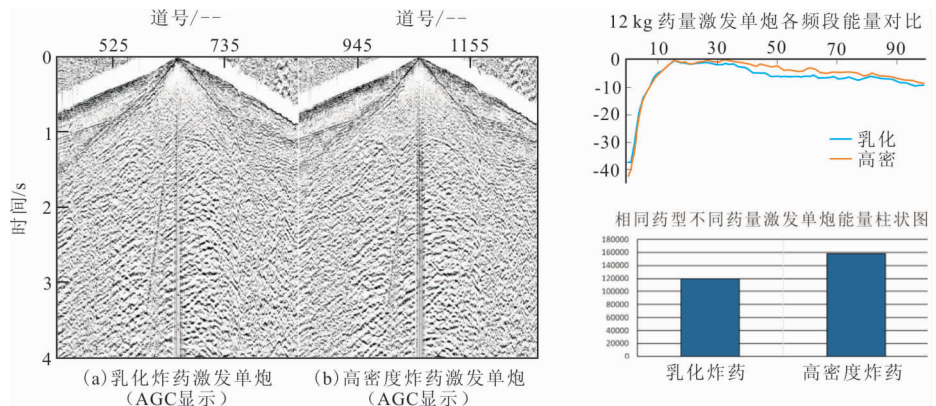


图 3 三叠系碳酸盐岩介质 12 kg 乳化炸药和 12 kg 高密度炸药单炮及其能量定量分析
 Fig.3 Triassic carbonate medium, the single shot seismic data and its energy Quantitative analysis of 12 kg emulsion explosive and 12 kg high density explosive

针对下三叠统飞仙关组碳酸盐岩介质,对比 12 kg 乳化炸药和 12 kg 高密度炸药试验单炮记录,单

炮记录整体相似,线性干扰波及次生线性干扰波(线性干扰波遇到地形或岩性突变点形成的反向线性干

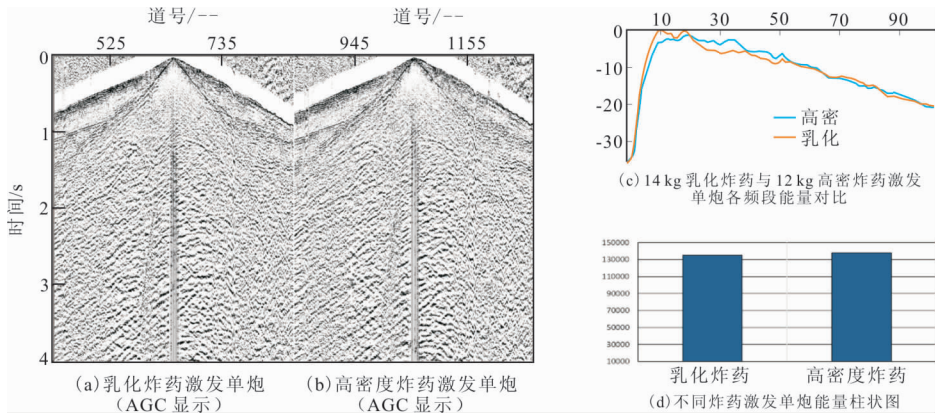


图 4 三叠系碳酸盐岩介质 14 kg 乳化炸药和 12 kg 高密度炸药单炮及其能量定量分析
 Fig. 4 Triassic carbonate medium, the single shot seismic data and its energy Quantitative analysis of 14 kg emulsion explosive and 12 kg high density explosive

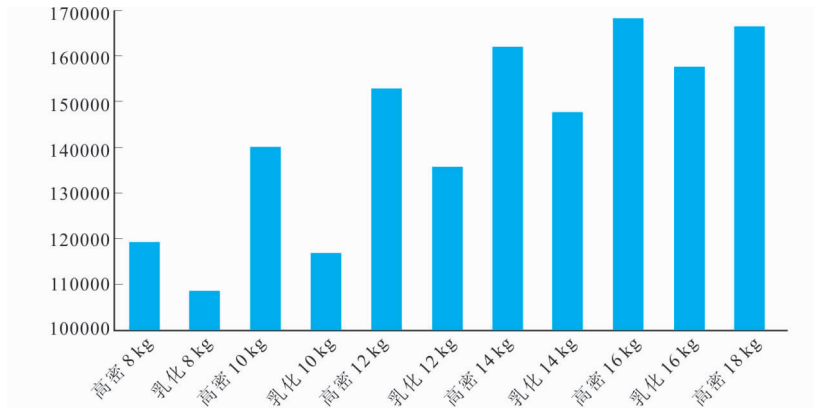


图 5 乳化炸药和高密度炸药不同药量单炮能量统计柱状图
 Fig. 5 The bar chart of single shot seismic data energy statistics of different emulsion explosives and high density explosives

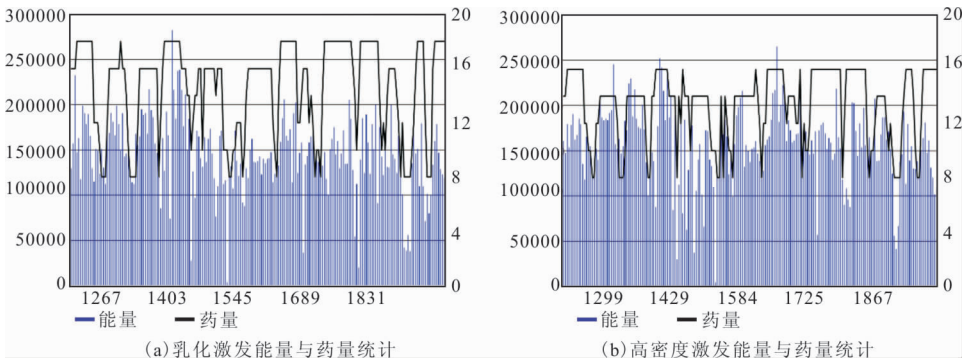


图 6 高密度炸药和乳化炸药不同药量单炮能量对比统计柱状图
 Fig. 6 The bar chart of energy contrast of single shot seismic data with different high density explosive and emulsion explosive

扰波)均比较发育;能量定量分析表明,乳化炸药单炮能量仅为高密度炸药单炮的74.64%(图3)。当乳化炸药增加2 kg后,即采用14 kg乳化炸药单炮能够达到12 kg高密度炸药单炮能量的97.72%,单

炮信噪比整体相似(图4)。

同样地,当乳化炸药和高密度炸药同时再增加2 kg,即在下三叠统飞仙关组碳酸盐岩介质中,乳化炸药增加至16 kg,与相邻的14 kg高密度炸药激

表 2 乳化炸药与高密度炸药不同药量激发单炮能量关系量表(百分比)

Tab. 2 The single shot seismic data energy relationship scale of emulsion explosive and high density explosive (percentage)

	乳化 8 kg	乳化 10 kg	乳化 12 kg	乳化 14 kg	乳化 16 kg	乳化 18 kg
高密度 8 kg	0.73	0.98	1.14	1.24	1.32	1.35
高密度 10 kg	0.78	0.76	0.97	1.06	1.13	1.15
高密度 12 kg	0.71	0.76	0.78	0.97	1.03	1.05
高密度 14 kg	0.65	0.70	0.82	0.83	0.95	1.02
高密度 16 kg	0.61	0.70	0.81	0.88	0.94	0.97

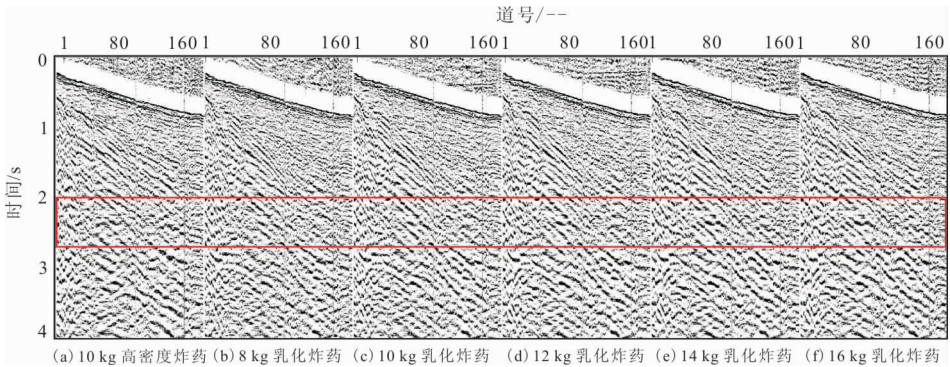


图 7 志留系泥页岩介质不同激发因素单炮对比(AGC)

Fig. 7 The single shot seismic data comparison of different excitation factors in Silurian shale medium (AGC)

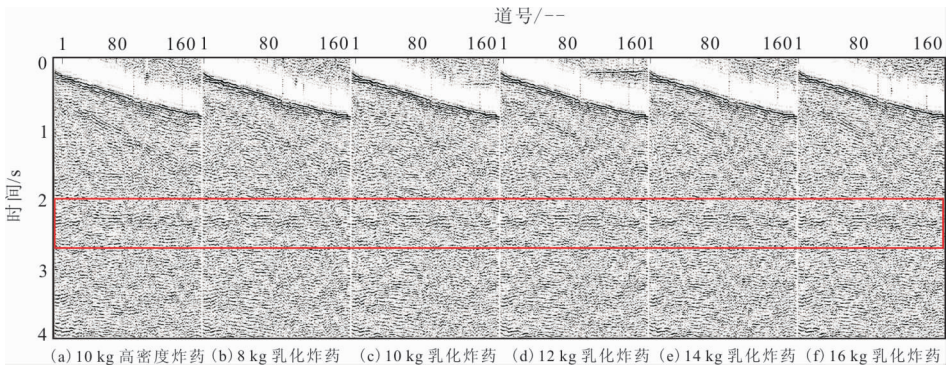


图 8 志留系泥页岩介质不同激发因素单炮对比(20 Hz~40 Hz)

Fig. 8 The single shot seismic data comparison of different excitation factors in Silurian shale medium (20 Hz~40 Hz)

发单炮相比,乳化炸药单炮能量达到高密度单炮能量的 95.45%。

依托大量的碳酸盐岩介质试验单炮数据,我们对高密度炸药单炮和乳化炸药单炮分别进行能量统计,然后对相同药型相同药量单炮能量取平均值形成柱状图(图 5 和图 6),由图 5 图 6 可见,相同药量情况下,乳化炸药单炮能量值均比高密度炸药单炮能量值低,乳化炸药增加 2 kg 药量后单炮能量才能与高密度炸药单炮能量接近。在此基础上,我们以

生产中常用的高密度炸药为基准,统计乳化炸药单炮与高密度炸药单炮能量比值,构建了碳酸盐岩介质中高密度炸药单炮与乳化炸药单炮能量关系量表(表 2)。由表 2 可知,相对小药量(≤ 14 kg)激发时,高密度炸药单炮与乳化炸药单炮能量相差较大,当药量达到 16 kg 以上时,两种药型激发单炮能量差异较小,表明 16 kg 乳化炸药基本达到饱和激发。

由上述分析可知,对于碳酸盐岩介质,当选用不小于 8 kg 但尚未达到饱和药量激发时,相同药量乳

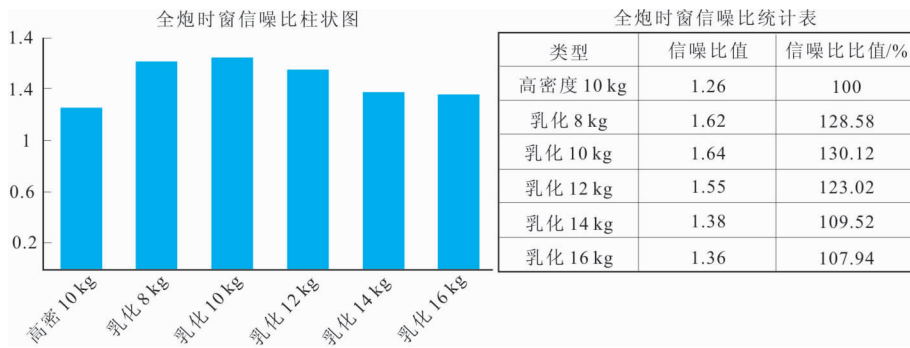


图 9 志留系泥页岩不同激发因素单炮信噪比分析

Fig. 9 The histogram of signal-to-noise ratio of Silurian shale single shot seismic data with different excitation factors

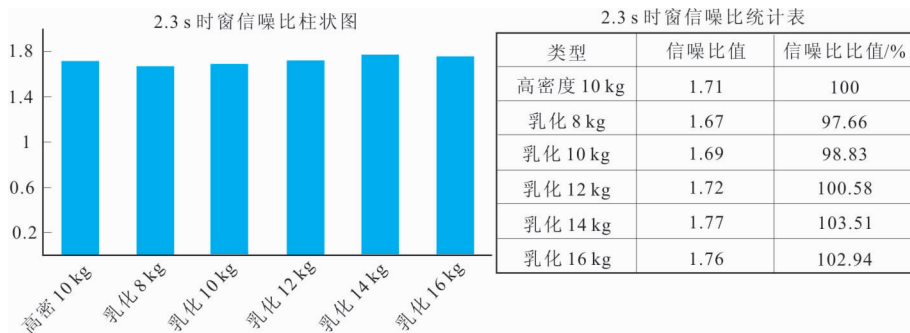


图 10 志留系泥页岩 2.3 s 时窗(目标层)不同激发因素单炮信噪比分析

Fig. 10 Histogram of signal-to-noise ratio of Silurian shale 2.3 s time window (target bed) single shot seismic data with different excitation factors

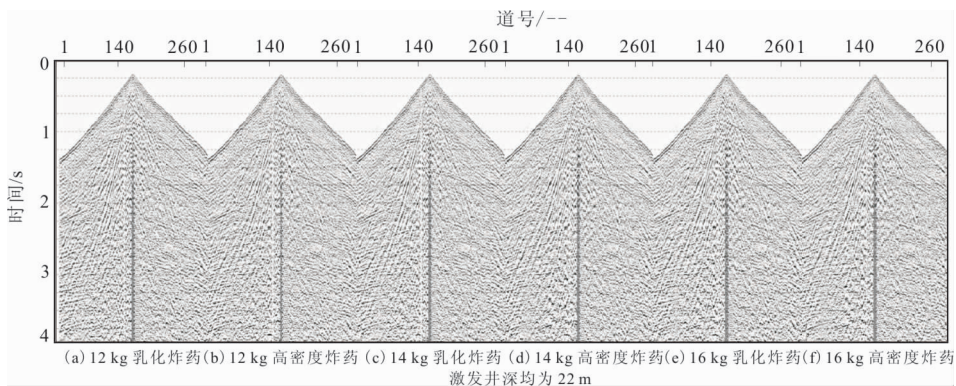


图 11 侏罗系砂岩介质相同药量不同药型单炮对比(AGC)

Fig. 11 The single shot seismic data comparison of different excitation factors in Jurassic Sandstone (AGC)

化炸药激发单炮能量基本为高密度炸药激发单炮能量的 75% 左右, 但乳化炸药较高密炸药增加 2 kg 药量后, 单炮能量达到高密度炸药预期的 95% 以上, 可以替代高密度炸药进行生产。

同样地, 在志留系泥页岩介质中, 以 10 kg 高密度炸药为基准, 对乳化炸药从 8 kg~16 kg 激发开

展系统试验(图 7~图 8)。试验数据表明, 8 kg 乳化炸药单炮能量较弱, 10 kg 及以上乳化炸药单炮与高密度炸药单炮能量相差不大。乳化炸药不同药量激发单炮能量与 10 kg 高密度炸药激发单炮能量的比值统计如下: 8 kg 约为 73.68%; 10 kg 约为 94.74%; 12 kg 约为 121.05%。在 2.0 s~2.5 s 时

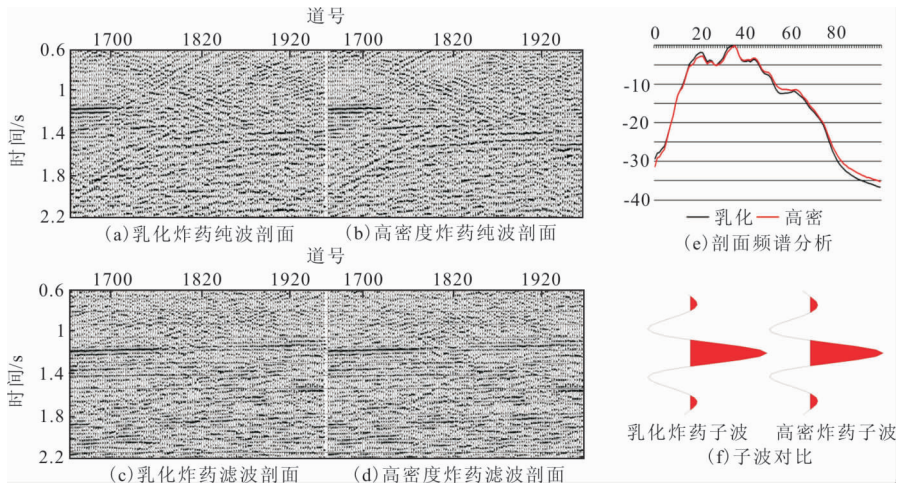


图 12 乳化炸药与高密度炸药剖面对比(上纯波,下滤波)及属性分析(滤波剖面属性)

Fig. 12 Comparison of profile (Above is the pure wave profile, below is the filter profile) and properties between emulsion explosive and high density explosive

窗内(目标层)能量比值统计如下:8 kg 约为 68.29%;10 kg 约为 97.56%;12 kg 约为 104.88%。试验数据表明在泥页岩介质中,不同药型相同药量激发单炮的全炮能量和目标层能量均基本相当(约 95%)。信噪比方面,不同药型单炮记录信噪比整体相似(图 9)。从 2.0 s~2.5 s 时窗(目标层)信噪比定量分析来看,不同药型不同药量差异不大,10 kg 高密度炸药单炮信噪比 1.71,10 kg 乳化炸药单炮信噪比 1.69,为高密度单炮的 98.83%,12 kg 乳化炸药单炮信噪比 1.72,为高密度单炮的 100.58%(图 10)。试验表明在泥页岩介质中,乳化炸药单炮能量和信噪比与高密度炸药单炮基本相当,可以用相同药量的乳化炸药替代高密度炸药进行生产。

从侏罗系砂岩介质试验单炮数据来看,相同药量不同药型激发单炮记录也基本相当(图 11),这与高密度炸药、乳化炸药与砂岩介质耦合性相似相符。因此,砂岩区也可以用相同药量的乳化炸药替代高密度炸药开展生产。

从资料成像效果来看,乳化炸药与高密度炸药生产剖面品质基本相当,剖面的频谱、子波形态高度相似(图 12)。所以针对不同围岩介质优选激发药量,可以用环保乳化炸药替代高密度炸药在南方复杂山地开展生产以适应绿色安全的勘探发展要求。

4 结论

1) 环保乳化炸药震源在南方复杂山地可以替代

高密度炸药震源开展生产,两种药型激发单炮记录品质基本相当,可以在南方复杂山地推广应用。

2) 碳酸盐岩介质,当采用 8 kg 以上药量但尚未达到饱和药量激发时,相同药量乳化炸药激发单炮能量是高密度炸药激发单炮能量的 75%左右;乳化炸药设计药量较高密度炸药药量增加 2 kg 后,可以达到高密度炸药预期能量的 95%以上。

3) 泥页岩介质和砂岩介质,相同药量情况下,乳化炸药激发单炮与高密度炸药激发单炮能量相似,能够达到高密度炸药单炮能量的 95%左右,可以按照高密度炸药设计药量开展生产。

参考文献:

- [1] 赵伟,田国发. SY/T6280—2013 石油物探地震队健康、安全与环境管理规范[M]. 北京:国家能源局发布,2013.
ZHAO W, TIAN G F. Health, safety and environment management specification for seismic crew [M]. Beijing: Released by the National Energy Administration, 2013. (In Chinese)
- [2] 刘伟,李明翼,陈江力,等. 环保型乳化炸药激发技术在四川盆地的应用[J]. 天然气勘探与开发, 2019, 42(1): 42—47.
LIU W, LI M Y, CHEN J L, et al. Application of excitation technology with environment—friendly emulsion explosive to Sichuan basin [J]. Natural Gas Exploration and Development, 2019, 42(1): 42—47. (In Chinese)

- [3] 齐东菊. 从环保视角看乳化炸药与铵梯炸药[J]. 科技情报开发与经济, 2006, 16(15): 258—259.
 QI D J. Discussion on the emulsified explosion and TNT explosion from the angle of environmental protection[J]. Sci-Tech Information Development & Economy, 2006, 16(15): 258. (In Chinese)
- [4] 震源药柱 ZY60-2-G I 说明书[M]. 荆门:湖北凯龙化工集团有限公司, 2005.
 Seismic charge ZY60-2-GI specification [M]. Jingmen: Hubei Kailong Chemical Group Co., Ltd, 2005. (In Chinese)
- [5] KL 型乳化震源药柱说明书 (RZYXX-X-GI) (2017A) [M]. 荆门:湖北凯龙化工集团有限公司, 2017.
 KL Type emulsion seismic source grain specification (RZYXX-X-GI) (2017 A) [M]. Jingmen: Hubei Kailong Chemical Group Co., Ltd, 2017. (In Chinese)
- [6] 周昕清. 爆炸动力学及其应用[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社, 2001.
 ZHOU T Q, The dynamics of explosion and its use [M]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2001. (In Chinese)
- [7] 齐中山. 改善灰岩裸露区地震激发环境的方法探讨[J]. 石油物探, 2015, 54(4): 382—387.
 QI Z S. Discussion on the improvement of the shooting circumstance for the seismic acquisition in limestone outcropped area[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2015, 54(4): 382—387. (In Chinese)
- [8] 杨勤勇, 常鉴, 徐国庆. 灰岩裸露区激发机理研究[J]. 石油地球物理勘探, 2009, 44(4): 399—405.
 YANG Q Y, CHANG J, XU G Q. Study on shooting mechanism of seismicwaves in limestone exposed area [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2009, 44(4): 399—405. (In Chinese)

Study on adaptability of environment—friendly emulsion explosive in seismic exploration in complex mountainous area of south China

LI Suguang, WANG Jingbo, JIANG Fuyou

(Sinopec Exploration Company, Chengdu 610041, China)

Abstract: At present, high-density explosive is the primary source of seismic data acquisition in the mountainous area of south China. The composition and properties of high-density explosives have excellent potential safety and environmental hazards in production, contrary to the concept of green safety exploration. Therefore, exploring the adaptability of environment—friendly emulsion explosive sources in southern mountainous seismic exploration and promoting the change from mountainous seismic exploration to safety and environmental protection is imperative. This paper systematically analyzes a large number of production test data. It discusses the adaptability of environment—friendly emulsion explosives in carbonate rock outcrop areas, shale outcrop area, and sandstone outcrop area in a southern mountainous area and the feasibility of its replacing high-density explosive; it will lay a foundation for the application of Environmental Protection emulsion explosive in mountain exploration in south China.

Keywords: high density explosives; emulsion explosives; Southern mountains; safety and environmental protection; seismic exploration; explosive source