

# 陆上石油地震勘探炸药震源研究进展

陈健

中国船舶信息中心,北京 100192

**摘要** 炸药震源是陆上石油地震勘探中常用的激发源,炸药震源的特性研究对提高爆炸地震波能量和地震分辨率具有十分重要的意义。本文从炸药震源的装药组分和装药结构两个方面综述了相关研究进展,评述了这些进展的实际应用价值与局限性,并探讨了未来可能的研究方向。在炸药震源装药组分方面,介绍了地震勘探对炸药震源的基本要求;分析了有助于提高爆炸地震波能量的炸药配方设计方法;总结了我国近20年应用的4种主要震源的装药组分。在炸药震源装药结构方面,分别介绍了多级延迟叠加震源、低爆速细长型震源、聚能型震源、多井组合震源及螺旋装药震源的结构设计原理和爆炸作用机理;分析了各类型震源的应用效果和适用范围;并展望了炸药震源未来可能的发展方向。

**关键词** 爆炸力学;地震勘探;炸药震源;土中爆炸

**中图分类号** TD235.21,P631.4+11

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.25.011

## Progress of Explosive Source for Land Petroleum Seismic Exploration

CHEN Jian

China Shipbuilding Information Center, Beijing 100192, China

**Abstract** An explosive source is the most commonly used excitation source in seismic exploration. Studies on the characteristics of explosive source play an important role in improving energy and resolution of seismic waves. In this paper, the progress of components and structures of explosive charge are reviewed. Then the practical application value and limitation are commented and the potential future research directions are pointed out. The basic requirement of explosive source for seismic exploration is introduced, and the method of formulation design of explosive to improve seismic wave energy is analyzed and four main charge components during the last twenty years are summarized. On the other hand, the design principle and mechanism of charge structure including multi-level-delayed charge, low detonation velocity and elongated charge, shaped charge, multi-well shot arrays charge and screwing charge are introduced, respectively, and the application effect and scope of each type of explosive structure are analyzed, and looks forward to the prospect of explosive source in the future.

**Keywords** mechanics of explosion; seismic exploration; explosive source; explosion in soil

### 0 引言

石油作为人类生存和社会发展的基础能源之一,被广泛应用于各个领域,在国际政治舞台和经济领域中占有不可替代的战略地位。目前,在勘探石油资源的各种方法中,地震勘探技术当之无愧的成为了油气藏勘探的主角,中国约90%以上的石油储量都是依靠地震勘探技术找到的<sup>[1]</sup>。陆上石油地震勘探是一项复杂的系统工程,主要工作流程包括:震源激发地震波、野外资料采集、室内资料处理和地震资料解释<sup>[2]</sup>。可以说,震源激发地震波是地震勘探的“第一把力”,震源激发效果的优劣直接影响后续工作的开展。地震勘探技术发展至今,地震信号的激发源已有炸药震源和非炸药震源两

种。炸药震源在地震勘探中的应用最早可以追溯到1921年,Karcher等<sup>[3]</sup>在俄克拉荷马州首次进行了地震法找油试验。此后,前苏联和一些西方国家开始尝试使用炸药作为震源。由于炸药震源具有良好的脉冲性能和较高的激发能量,所以,自20世纪20年代一直沿用至今。

在中国陆上石油地震勘探中,约95%的地震勘探队应用炸药震源<sup>[4]</sup>(国外约40%<sup>[5]</sup>),使用的大多是不同装药或不同结构的固体炸药震源。这种方法是利用炸药在土介质中爆炸产生的瞬态强扰动,借助地层中产生的地震反射波,构制可用于测定和分析地层结构的地震图来实现勘探目的,亦称反射地震勘探方法,原理如图1所示。

收稿日期:2013-05-26;修回日期:2013-07-01

作者简介:陈健,博士,研究方向为爆炸力学,电子邮箱:cjlmusic@126.com

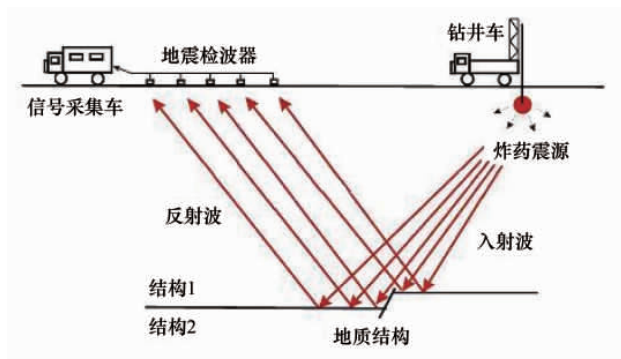


图 1 地震勘探原理

Fig. 1 Diagram of seismic surveying

影响爆炸地震波产生和传播的因素是多方面。然而,这些因素最终可以归结为炸药震源、传播介质和传播路径3方面的影响。相对而言,爆炸源的影响规律比较复杂,它与爆炸地震波的产生区密切相关<sup>[6]</sup>。当激发岩性基本一致时,炸药震源的爆炸特性是影响地震波场特征参数的主要因素。等药量条件下,炸药爆炸特性主要由炸药的装药组分和装药结构决定。炸药激发的地震波品质以特征参数表示为:地震波能量、信噪比、主频及频带宽度<sup>[2,78]</sup>。因而,开展炸药震源的特性研究,开发石油勘探用新型炸药震源,对石油地震勘探技术的发展具有积极的推动意义和实际应用价值。本文就国内外有关炸药震源的研究进行总结分析,从炸药震源的装药组分和装药结构两方面进行详细评述,以期今后的研究提供参考。

## 1 炸药震源的装药配方

炸药配方决定炸药的爆炸性能,直接影响炸药激发地震波的品质特征。地震勘探对炸药震源的要求是:炸药爆炸产生的地震波经深层反射后仍具有能量(振幅)大、频率适中、频带宽及信噪比高等特点,同时兼顾炸药的安全性和低成本<sup>[9]</sup>。炸药震源的配方主要是基于上述原则进行研究和设计的。

为提高爆炸地震波能量,很多研究人员采用增大药量和增加激发井深的办法实现,但由于费用高、效率低的原因,应用受到一定限制。此后,人们把研究的重点集中在炸药爆炸的本质特征,试图通过改变炸药的组分和配比来调节炸药的爆炸性能,达到提高爆炸地震波能量的目的。Lex等<sup>[10]</sup>研制了一种石油勘探用震源药剂,配方组分包括:硝酸铵、乌洛托品、涂料级铝粉、硝酸钾、沥青。Tite等<sup>[11]</sup>采用高能铝粉(AL)和富氧化物高氯酸铵(AP)作为主体能源,二甘醇(EG)作为载体,配置了一种高能炸药(HEMCE),配方组分及质量比为:AL/AP/EG=20/56/24。单炮实验结果表明,与常规震源相比,HEMCE激发的地震波能量(均方根振幅值)提高了约35%。Bremner等<sup>[12]</sup>基于对爆炸过程和热力学模拟,研究了岩土中爆炸地震波能量的转化问题,据此合理设计炸药爆炸参数(如爆速、能量密度、爆容等),研制了一种含有金属粉的地震专用炸药(dBX),单炮记录显示dBX激发的地震波能量在目的

层提高了12dB。Annikov等<sup>[13]</sup>配置了一种低爆速、低爆压、高做功能量的含水炸药,这种炸药主要以硝酸铵、水、铝粉、尿素为主体成分,采用柔性聚合物管装药,具有小型化、浅埋深、稳定性好的特点。

中国地震勘探始于20世纪50年代,长期以来普遍使用硝酸铵炸药作为震源<sup>[14]</sup>。随着地震勘探技术的发展和高精度勘探要求的不断提高,炸药震源的激发技术逐渐得到重视。陆明等<sup>[15-17]</sup>采用膨化硝酸铵代替硝酸铵,先后研制了高、中、低3种爆速的震源药柱,使内填药中的TNT含量降低50%。罗洪成等<sup>[18]</sup>探讨了石油勘探炸药设计的关键技术,研究认为炸药中应加入一定量的负氧化物提高炸药的爆温,加入适当铝粉提高炸药的爆热。2004年,陆明等<sup>[19]</sup>通过建立配方设计数学模型,制备了一种威力高于常规硝酸铵炸药15%的震源药柱,配方为:膨化硝酸铵67.3%、木粉1%、柴油0.3%、石蜡0.7%、TNT25%、铝粉5.7%。

近20年,中国炸药震源的发展较为迅速,此间产生了一系列关于震源装药及配方的专利。这些专利基本涵盖了我国现用的4种主要的震源装药成分,即铵梯震源药柱<sup>[20-21]</sup>,膨化硝酸铵震源药柱<sup>[22]</sup>,胶质炸药震源药柱<sup>[23,24]</sup>和乳化炸药震源药柱<sup>[27-31]</sup>。此外,有学者利用废弃发射药、炸药作为震源药柱,使废弃发射药有了合理有效的利用价值<sup>[32-34]</sup>。总体来看,震源装药配方的研究主要以提高爆炸地震波能量为主要目的,研究手段基本采用炸药中添加高能金属来实现。

## 2 炸药震源的装药结构

炸药的装药结构即炸药的装填形式及药柱的空间分布状态,决定了炸药爆炸能量的输出形式和传播方向。装药结构不同的炸药在岩土中爆炸时,爆炸波与周围岩土介质会形成不同的作用方式,并产生相应的地震效应。多年来,国内外研究人员基于各自的研究理论,结合长期的实践经验和试验结果,设计了多种适用于地震勘探的震源装药结构,其中主要包括多级延迟叠加震源、低爆速细长型震源、聚能震源、多井组合震源和螺旋装药震源。

### 2.1 多级延迟叠加震源

多级延迟叠加震源是针对深层勘探提出的一种炸药激发方式。在地震勘探中,地震波的主频和振幅(能量)之间存在的矛盾仍然是激发技术面临的瓶颈。研究表明<sup>[35-37]</sup>,小药量激发地震子波的主频高、能量弱,而大药量激发地震子波的能量高,但高频能量相对较弱。为达到高分辨率、深层勘探的要求,实现高能量、高主频的激发特性,多级延迟叠加震源应运而生。这种震源结构的设计是建立在波动理论和爆炸理论基础之上,按照多级药柱纵向间隔分布的装药形式,采用由上至下延迟起爆的激发方式,使各爆炸单元所产生的地震波的波前在垂直向下的方向得到同相叠加,同时实现对地震波主频和下传能量的提高,并减小对地表的振动和破坏。多级延迟叠加震源激发原理如图2所示。

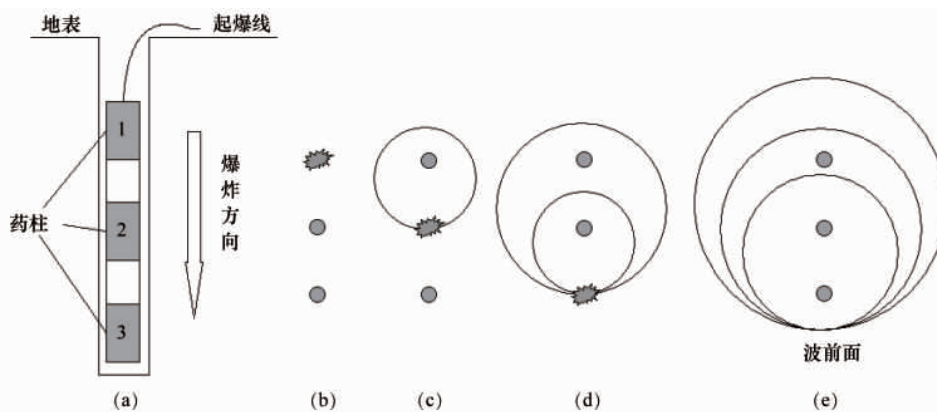
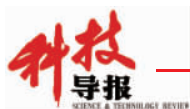


图2 延迟叠加震源激发原理示意

Fig. 2 Excitation principle of delayed stack source

注: (a) 震源装药结构; (b) 药柱1起爆; (c) 药柱2起爆; (d) 药柱3起爆; (e) 波前叠加传播。

Notes: (a) Charge structure of source; (b) Initiation of grain 1; (c) Initiation of grain 2; (d) Initiation of grain 3; (e) Wavefront superposition spread.

1936年, Voorhees等<sup>[38]</sup>最早指出单发集中药包一次起爆产生地震波振幅衰减速度快, 不具备波动持续性, 并认为这种激发方式得到的大部分是冲击波, 不利于地震波能量的转化。为改善激发效果, 他们首次提出了多个药柱垂向间隔分布的装药结构, 打破了以往使用的集中装药结构, 虽然采用的是同时起爆方式, 但多级延迟叠加震源的装药形式已初见雏形。此后, 在Voorhees提出的装药结构基础上, 出现许多关于延时起爆的研究工作。Lang<sup>[39]</sup>采用长度可调式元件作为两节药柱的连接件, 通过改变中间元件长度的方法改变爆炸需要的时间。Martner等<sup>[40]</sup>提出了药间距的设计方法。Tite等<sup>[41]</sup>在每节药柱之间装有一个障碍物, 通过调节障碍物来控制延迟时间, 可控制范围在0.1~100ms。Eisler<sup>[42]</sup>说明了延迟时间的控制方法。Morris<sup>[43]</sup>利用电脉冲起爆技术对炸药延迟时间进行控制。Arnold等<sup>[44]</sup>利用延迟叠加震源获得了较高的地震子波主频和能量。

中国早期涉足延迟叠加震源的研究工作始于20世纪80年代, 刘业厚等<sup>[45]</sup>分析了延迟叠加震源的激发原理和关键技术。之后, 国内很多学者(胡立新等<sup>[46]</sup>、谭绍泉<sup>[47]</sup>、徐淑合等<sup>[7]</sup>、于世煊等<sup>[48]</sup>、张文等<sup>[49]</sup>、宋玉龙等<sup>[50]</sup>)应用弹性波动力学理论分析了延迟叠加技术原理, 并与常规震源进行对比试验, 研究认为, 叠加震源的影响因素主要是炸药性质、药量、级数及级间距。李文彬等<sup>[51-53]</sup>分别采用实验和数值模拟的方法研究了延迟叠加震源对激发地震波能量的影响, 认为药柱间隔距离应大于单级药柱的破坏半径, 以保证地震波叠加的可靠性。

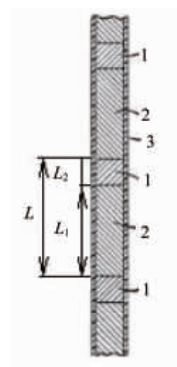
前人的研究表明, 多级延迟叠加震源的关键技术是对延迟时间的控制。目前, 雷管是炸药震源普遍采用的起爆件, 是控制震源激发时间的主要部件, 由于雷管存在较大的起爆误差(几十个毫秒量级), 延迟时间始终未能达到延迟叠加震源的技术要求, 进而限制了延迟叠加震源的使用。

## 2.2 低爆速细长型震源

低爆速细长型震源是根据阻抗耦合理论提出的一种装药结构。阻抗耦合, 即炸药阻抗与岩石阻抗之比。理论研究表明, 炸药岩土中爆炸所产生的地震波波阵面的形状和传播方向, 将取决于炸药的爆炸速度与激发层的纵波速度。当炸药的爆速与激发岩性的速度接近时, 激发出的地震子波频率偏高且激发能量最强, 因此, 应控制炸药的爆速尽量与激发层的纵波速度接近, 即速度匹配。1956年, Silverman等<sup>[54]</sup>基于速度匹配理论设计了一种细长震源药柱, 该药柱由高爆速药柱与低爆速药柱相间连接而成。通过调节两部分元件的长度来调整爆速。其长度比例由下列公式求得:

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{V_1(V_2 - V)}{V_2(V - V_1)}$$

式中,  $V$  为地震波在介质中的传播速度;  $L_1$  与  $V_1$  分别为高爆速药柱的长度和爆速;  $L_2$  与  $V_2$  分别为低爆速药柱的长度和爆速。细长型震源结构如图3所示。



1—高爆速药柱; 2—低爆速药柱; 3—防水壳

图3 细长型震源结构示意图

Fig. 3 Diagram of elongated source charge

1962年,Nicholls<sup>[55]</sup>通过一些试验研究了炸药的几何耦合和阻抗耦合问题。结果表明,当药柱半径和井的半径相等、炸药阻抗和激发介质的阻抗相等时,所产生的能量最大。钱绍瑚等<sup>[56]</sup>基于弹性动力学和爆炸原理,分析了细长药柱的爆炸机制。黄文尧等<sup>[57]</sup>和堵平等<sup>[58]</sup>介绍了低爆速细长震源药柱的结构和性能特征。陆明等<sup>[17]</sup>和吕淑然等<sup>[59]</sup>对低爆速细长震源药柱配方进行了研究。陈双华等<sup>[60]</sup>采用大威力混合炸药和高强度外壳制成一种低爆速细长震源。通过试验证明该药柱可以有效地拓宽频带至220Hz以上,目的层反射波的主频提高至120Hz。多年来,低爆速细长震源的激发效果得到了研究人员的认可,但由于现场操作复杂、药柱拒爆、井深增加等问题,这种震源并没有得到普遍应用。

### 2.3 聚能型震源

聚能装药结构的特点是药柱一端具有空穴槽,爆炸可产生具有强侵彻穿透能力的聚能射流。聚能装药结构最早出现在第二次世界大战期间,主要用于打击和穿透坚硬的武器装备<sup>[61,62]</sup>。此后,地震勘探人员尝试将聚能装药结构应用于地震勘探领域。

1953年,Poulter<sup>[63]</sup>研制了一种聚能装药震源弹,该装置由两个相同的聚能药柱组合而成,两药柱之间由一个雷管起爆。两个对称的药柱有一定的倾斜角 $A$ ,表示为

$$A = \arctan(v_{\text{sonic}}/v_{\text{jet}})$$

式中, $v_{\text{sonic}}$ 为声速, $v_{\text{jet}}$ 为射流速度。该震源的特点是用药量小,操作方便,产生的能量大,采集的地震波信号强烈。装药结构如图4所示。

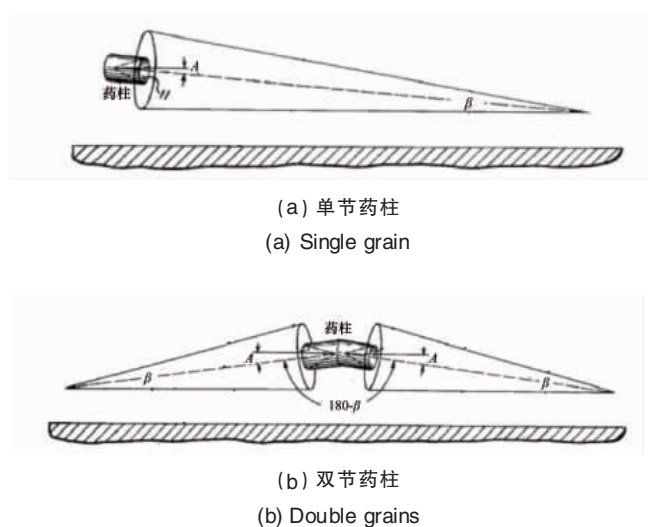


图4 聚能震源激发原理示意

Fig. 4 Excitation principle of concentrating energy source

赵殿栋等<sup>[64]</sup>采用聚能装药震源进行了单炮实验,结果表明,聚能装药结构激发的地震波效果优于常规震源。翟言清等<sup>[65]</sup>、吕选勤等<sup>[66,67]</sup>、秦卫国等<sup>[68]</sup>、吕公河等<sup>[69]</sup>和王新红等<sup>[70]</sup>分别

研制了聚能装药震源,并指出聚能结构的炸药震源可产生高频率的地震信号,达到提高地震资料分辨率的目的;爆炸能量能更加有效地集中向下传播,提高反射波强度;最大限度地减轻了爆炸产生的面波强度等特性。

### 2.4 多井组合震源

Hawkins等<sup>[71]</sup>采用多井空间分布的装药形式,中心药柱埋深小于周围对称井深度,采用同时起爆的激发方式。结果表明,与常规激发方法相比,等药量激发条件下该结构激发的地震波纵波能量高、钻井深度浅。震源装药形式如图5所示。

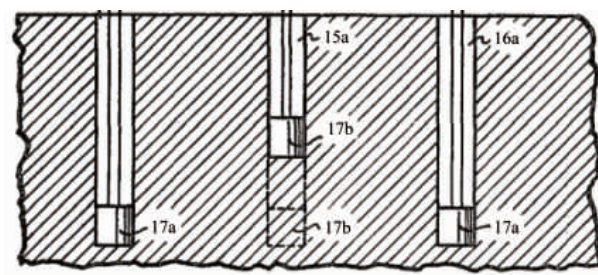


图5 多井组合震源装药示意

Fig. 5 Diagram of multi-well combination source

刘怀山等<sup>[72]</sup>认为,井组合具有检波器组合的同等组合效应,并对多井组合震源进行试验研究。结果表明,采用小药量、浅井、小井距激发的组合爆炸法,不仅能提高有效波的高频成分,还可兼顾中深层的反射能量。王卫华<sup>[73]</sup>基于弹性力学理论,结合日常生活中的感性认识,分析了多井激发方式的使用条件和应用效果,分析认为,多井组合的激发方式适用于难打井的地区,鉴于该方式成本高、效果差的缺点,该震源应尽量少用或不用。吕公河<sup>[74]</sup>针对弱弹性介质中激发地震波的困难进行分析,提出采用多井组合激发增大激发作用面的对策,并通过现场实验进行了验证分析,结果表明,随着井间距的增大,地震波能量和信噪比均有所提高,进一步说明了多井组合震源结构可以有效地改善在弱弹性介质中的激发效果。

### 2.5 螺旋装药震源

Silverman等<sup>[75]</sup>指出,低爆速药柱和延迟叠加震源存在起爆不可靠,操控性不好,井下定位不准确等弊端,进而研制了一种能够克服以上弊端的新型震源药柱。该装置带有0.64cm宽的装填螺旋药柱的凹槽,凹槽每节药柱之间均有固定插杆用于井下定位。药柱可连续稳定地传爆。Lang<sup>[76]</sup>发明了一种可控制爆速的震源弹,该产品采用螺旋装药,可以产生强烈的地震波,并已应用到地震勘探中。装药的总质量由传爆药质量和主装螺旋炸药的质量决定,而震源药柱的爆速则通过调整装药的质量来控制。该震源药剂由AN/FO(硝酸铵/油料)组成,并且药柱直径达到45.72cm为最佳,具有稳定持续的爆速。螺旋装药结构如图6所示。

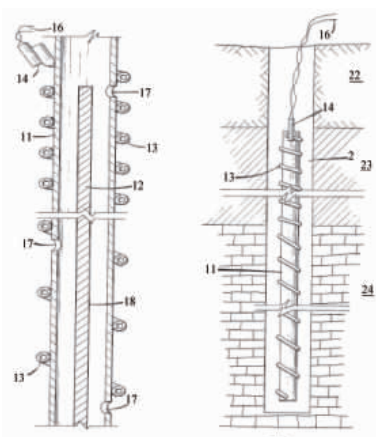
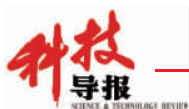


图6 螺旋装药震源示意

Fig. 6 Diagram of spiral charging source

### 3 结论与展望

综上所述,炸药震源是目前陆上石油地震勘探中应用最广泛的震源。过去几十年里,关于炸药震源的装药设计及激发技术已取得了很大的进展。然而针对不同条件(如地质、地貌及温度气候等)下如何设计和使用炸药震源,还有很多需要研究的工程问题。

在炸药震源的装药组分方面,人们主要沿用的是矿用铵梯炸药,虽然采用对炸药表面改性及添加高能金属粉的方法改善了炸药的激发性能,但始终没有掌握炸药震源装药配方的设计依据,尤其针对不同条件下炸药震源的设计和使用问题。近年来,测试技术的飞速发展发展为爆炸科学提供了有利的研究手段。如何建立评价炸药激发地震波特性的实验平台,了解炸药土中爆炸的作用及发展过程,掌握炸药爆炸性能对地震波场特征参数的影响规律,是炸药震源组分选择、配方设计的关键问题之一。

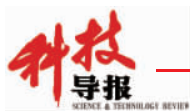
在炸药震源的装药结构方面,由于成本、起爆技术及井口直径等条件的限制,目前震源装药主要以常规柱形结构为主。如何能够打破传统的激发方式,实现震源装药小型化、浅埋深的特点是未来发展的方向。此外,爆炸作用过程对一定区域内的人员和设施的安全产生不利影响也是需要解决的问题之一,如炸药土中爆炸后形成的空腔所导致的地面塌陷以及对农田的污染,爆炸地震对地面建筑结构和设施的破坏。在城市、村镇等复杂地表条件下,实现既高效又安全的激发成为今后震源追求的目标。

#### 参考文献 (References)

[1] 李庆忠. 地球物理勘探技术推动了我国石油工业的迅速发展[J]. 中国工程科学, 2001(8): 25-28.  
Li Qingzhong. Engineering Science, 2001(8): 25-28.  
[2] 陆基孟, 王永刚. 地震勘探原理[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2008.  
Lu Jimeng, Wang Yonggang. The principle of seismic exploration [M]. Dongying: China Petroleum University Press, 2008.

[3] 毛宁波. 地震技术在石油勘探开发中的应用及其新进展[J]. 自然杂志, 1999(6): 325-328.  
Mao Ningbo. Nature Magazine, 1999(6): 325-328.  
[4] 潘生强. 地震专用成型炸药的研制[J]. 石油地球物理勘探, 1980(4): 77-82.  
Pan Shengqiang. Oil Geophysical Prospecting, 1980(4): 77-82.  
[5] Conyers L B. An introduction to applied and environmental geophysics [M]. Chichester: John Wiley & Sons Inc, 2011.  
[6] 林大超, 白春华. 爆炸地震效应[M]. 北京: 地质出版社, 2007.  
Lin Dachao, Bai Chunhua. Seismic effect of explosions[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007.  
[7] 徐淑合, 于静, 胡立新, 等. 多级延迟爆炸震源的研究与应用[J]. 石油地球物理勘探, 2003(4): 341-349.  
Xu Shuhe, Yu Jing, Hu Lixin, et al. Oil Geophysical Prospecting, 2003 (4): 341-349.  
[8] 李庆忠. 走向精确勘探的道路[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994.  
Li Qingzhong. Exploration on the road toward precise[M]. Beijing: China Petroleum Industry Press, 1994.  
[9] 吕春绪. 工业炸药理论[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2002.  
Lü Chunxu. Theory of industrial explosives[M]. Beijing: Weapon Industry Press, 2002.  
[10] Lex L U. Seismic explosive composition: US, 4528049A[P]. 1985-07-09.  
[11] Tite G A, Brooks J E, Voreck W E. High energy explosive for seismic methods: US, 6651564B1[P]. 2000-07-17.  
[12] Bræmner D L, Tite G A, Thompson P, et al. Enhanced signal-to-noise ratio and bandwidth through explosives design[C]. 2002 SEG Annual Meeting, Salt Lake City, Utah, USA, October 6-11, 2002.  
[13] Annikov E V, Kondrikov B N, Kazakov A T. Research and development of the new explosive sources of seismic waves for geophysical investigations[C]. Eleventh International Detonation Symposium: Proceedings. Snowmass, Colorado: Office of Naval Research, Naval Surface Warfare Center (US), Indian Head Division, 1998.  
[14] 欧庆贤. 独立自主地发展我国石油地震勘探工作[J]. 石油地球物理勘探, 1976(6): 1-8.  
Ou Qingxian. Oil Geophysical Prospecting, 1976(6): 1-8.  
[15] 陆明, 吕春绪, 刘祖亮, 等. 少梯膨化硝酸铵震源药柱的研究[J]. 南京理工大学学报: 自然科学版, 1999(3): 73-77.  
Lu Ming, Lü Chunxu, Liu Zuliang, et al. Journal of Nanjing University of Science and Technology: Natural Science Edition, 1999(3): 73-77.  
[16] 陆明, 吕春绪, 刘祖亮, 等. 膨化硝酸铵震源药柱配方的优化设计[J]. 兵工学报, 2000, 21(3): 217-219.  
Lu Ming, Lü Chunxu, Liu Zuliang, et al. Ordnance Technology, 2000, 21(3): 217-219.  
[17] 陆明, 吕春绪. 低爆速震源药柱的配方研究[J]. 火炸药学报, 2006(1): 14-16.  
Lu Ming, Lü Chunxu. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2006(1): 14-16.  
[18] 罗洪成. 石油勘探炸药设计的探讨[J]. 爆破器材, 1995(2): 12-14.  
Luo Hongcheng. Explosive Materials, 1995(2): 12-14.  
[19] 陆明, 胡炳成, 杜杨. 高威力震源药柱的配方研究[J]. 火炸药学报, 2004(4): 6-9.  
Lu Ming, Hu Bingcheng, Du Yang. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2004(4): 6-9.  
[20] 南京理工大学. 震源药柱及其制法: 中国, 97107103.9[P]. 1999-03-10.

- Nanjing University of Science and Technology. Method of manufacturing seismic explosive columns: China, 97107103. 9[P]. 1999-03-10.
- [21] 湖北凯龙化工集团股份有限公司. 一种震源药柱的主装药配方及其生产工艺: 中国, 200410012606.3[P]. 2005-07-02  
Hubei Kailong Chemical Group Co, Ltd. One kind of the main charge source grain recipe and production process: China, 200410012606.3[P]. 2005-07-02.
- [22] 国营和平化工厂. 新型震源药柱: 中国, 98214674.4[P]. 1999-07-07.  
Chemical State of Peace. New seismic charge: China, 98214674.4 [P]. 1999-07-07.
- [23] 国营和平化工厂. 粉状高爆速震源药柱: 中国, 00233133.0[P]. 2001-02-07.  
Chemical State of Peace. Powdered high detonation velocity seismic charge: China, 00233133.0[P]. 2001-02-07.
- [24] 新时代(济南)民爆科技产业有限公司. 一种铵油膨化高爆速震源药柱: 中国, 201010526624[P]. 2010-11-01.  
New Age (Jinan) China Explosion Technology Industry Co, Ltd. One kind of ANFO puffed high detonation velocity seismic charge: China, 201010526624[P]. 2010-11-01.
- [25] 四川省雅化实业有限责任公司. 一种用于地震勘探的震源药柱: 中国, 02276591.3[P]. 2003-08-20.  
Sichuan Elegance Industrial Co, Ltd. One kind of seismic charge for seismic exploration: China, 02276591.3[P]. 2003-08-20.
- [26] 辽阳庆阳爆破器材厂. 胶体高能震源药柱及其制备方法: 中国, 200410087561[P]. 2011-05-04.  
Liaoyang Qingyang Explosives Factory. Method of producing high energy seismic charge: China, 200410087561[P]. 2011-05-04.
- [27] 湖北凯龙化工集团股份有限公司. 高能乳化炸药震源药柱: 中国, 00229323.4[P]. 2000-12-27.  
Hubei Kailong Chemical Group Co, Ltd. Grain emulsion explosive energy source: China, 00229323.4[P]. 2000-12-27.
- [28] 兰州久联和平包装材料有限公司. 抗压型乳化震源药柱: 中国, 201020240552.7[P]. 2011-02-02.  
Lanzhou Long Joint Peace Packaging Materials Co, Ltd. Seismic charge compression type emulsion: China, 201020240552.7[P]. 2011-02-02.
- [29] 山西江阳兴安民爆器材有限公司. 线性乳化震源药柱: 中国, 201120011445.1[P]. 2011-01-15.  
Shanxi Jiangyang Xing'an Industrial Explosive Material Co, Ltd. Linear seismic charge emulsification: China, 201120011445.1[P]. 2011-01-15.
- [30] 辽宁庆阳化学工业公司民爆器材研究所. 震源药柱: 中国, 99222458.6[P]. 1999-01-12.  
Liaoning Qingyang Chemical Industry Corporation, Institute of Explosive Materials. Seismic charge: China, 99222458.6[P]. 1999-01-12.
- [31] 国营和平化工厂. 乳化震源药柱: 中国, 98215810.6[P]. 1998-06-19.  
Chemical State of Peace. Emulsification seismic charge: China, 98215810.6[P]. 1998-06-19.
- [32] 谢永祥, 韩承坤, 郭洋, 等. 含发射药震源药柱研制[J]. 爆破器材, 2006(4): 22-25.  
Xie Yongxiang, Han Chengkun, Guo Yang, et al. Explosive Materials, 2006(4): 22-25.
- [33] 吉林三三〇五机械厂化工材料分厂. 一种含火药震源药柱及制造工艺: 中国, 200510016993.2[P]. 2005-07-20.  
Jilin 3305 Machinery Factory Chemical Material Factory. Seismic charge containing gunpowder and manufacturing process: China, 200510016993.2[P]. 2005-07-20.
- [34] 山西江阳化工厂. 低爆速型震源药柱: 中国, 03217158.7[P]. 2004-03-31.  
Shanxi Jiangyang Chemical Factory. Low detonation velocity type seismic charge: China, 03217158.7[P]. 2004-03-31.
- [35] 潘文锋, 赵伟卫, 孟祥顺, 等. 高分辨率地震勘探中最佳药量及耦合条件的选取[J]. 石油地球物理勘探, 2000(4): 443-451.  
Pan Wenfeng, Zhao Weiwei, Meng Xiangshun, et al. Oil Geophysical Prospecting, 2000(4): 443-451.
- [36] 张智, 刘财, 邵志刚. 地震勘探中的炸药震源药量理论与实验分析[J]. 地球物理学进展, 2003(4): 724-728.  
Zhang Zhi, Liu Cai, Shao Zhigang. Progress in Geophysics, 2003(4): 724-728.
- [37] 傅朝奎. 关于地震采集中的井深和药量的研究[J]. 石油地球物理勘探, 1998(S1): 31-34.  
Fu Chaokui. Oil Geophysical Prospecting, 1998(S1): 31-34.
- [38] Voorhees V. Seismic surveying: US, 2064451[P]. 1936-12-15.
- [39] Lang H M. Adjustable time delay explosive charge element: US, 3238871[P]. 1966-03-08.
- [40] Matner S T, Arnold J M E. Distributed charge for seismic prospecting: US, 4313380[P]. 1982-02-02.
- [41] Tite G A, Brooks J E, Voreck W E. Seismic methods having extended energy release: US, 6648097[P]. 2003-11-18.
- [42] Eisler J D, Silveiman D, Tulsa O. Seismic wave generation: US, 2808894[P]. 1957-10-08.
- [43] Morris H B. Seismic impulse generation technique: US, 3687228[P]. 1972-08-29.
- [44] Arnold M E, Haylett J W. A new distributed charge[J]. Geophysics, 1981, 46(9): 1216-1226.
- [45] 刘业厚, 王忠林. 高分辨率井下组合延迟爆炸震源研究[J]. 大庆石油学院学报, 1987(1): 13-18.  
Liu Yehou, Wang Zhonglin. Journal of Daqing Petroleum Institute, 1987 (1): 13-18.
- [46] 胡立新, 杨德宽, 何兵寿, 等. 延迟爆炸法的理论分析[J]. 石油地球物理勘探, 2002(1): 33-38.  
Hu Lixin, Yang Dekuan, He Bingshou, et al. Oil Geophysical Prospecting, 2002(1): 33-38.
- [47] 谭绍泉. 震源延迟叠加技术及应用效果[J]. 石油物探, 2003(4): 427-433.  
Tan Shaoquan. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2003(4): 427-433.
- [48] 于世煥, 丁伟, 徐淑合, 等. 延迟震源技术在三维高分辨率地震勘探中的应用[J]. 石油物探, 2004(2): 111-115.  
Yu Shihuan, Ding Wei, Xu Shuhe. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2004(2): 111-115.
- [49] 张文, 陈勇, 周志才. 地震延迟叠加激发的药距选择[J]. 天然气工业, 2008(1): 70-72.  
Zhang Wen, Chen Yong, Zhou Zhicai. Natural Gas Industry, 2008(1): 70-72.
- [50] 宋玉龙, 吕公河, 王新红, 等. 垂向叠加震源冲击波激发地震波的能量分析[J]. 石油地球物理勘探, 2004(4): 371-374.  
Song Yulong, Lü Gonghe, Wang Xinhong, et al. Oil Geophysical Prospecting, 2004(4): 371-374.
- [51] 李文彬, 王晓鸣, 赵国志, 等. 高分辨率地震勘探的垂向叠加震源研究[J]. 南京理工大学学报: 自然科学版, 2002(1): 44-47.  
Li Wenbin, Wang Xiaoming, Zhao Guozhi, et al. Journal of Nanjing University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2002(1): 44-47.
- [52] 李文彬, 王晓鸣, 赵国志, 等. 延时叠加震源激发地震波能量的研究[J]. 爆破器材, 2004(1): 9-11.



- Li Wenbin, Wang Xiaoming, Zhao Guozhi, et al. Explosives Materials, 2004(1): 9-11.
- [53] 李文彬, 郑宇, 王晓鸣, 等. 延时叠加震源对地表振动的数值仿真[J]. 石油地球物理勘探, 2009(3): 257-260.
- Li Wenbin, Zheng Yu, Wang Xiaoming, et al. Oil Geophysical Prospecting, 2009(3): 257-260.
- [54] Silveiman D. Seismic wave generation: US, 2770312[P]. 1953-09-11.
- [55] Nicholls H R. Coupling explosive energy to rock[J]. Geophysics, 1962, 27(3): 305-316.
- [56] 钱绍瑚, 刘江平, 谷永兴, 等. 炸药震源爆炸机制及激发条件的研究[J]. 石油物探, 1998(3): 1-14.
- Qian Shaohu, Liu Jiangping, Gu Yongxing, et al. Geophysical Prospecting for Petroleum, 1998(3): 1-14.
- [57] 黄文尧, 颜事龙, 吕淑然, 等. 低爆速细长震源药柱的研究与应用[J]. 爆破器材, 2005(4): 18-22.
- Huang Wenyao, Yan Shilong, Lü Shuran, et al. Explosive Materials, 2005(4): 18-22.
- [58] 堵平, 黄东定, 王泽山. 一种低爆速炸药及其在地震勘探中的应用[J]. 兵工学报, 2005(4): 465-468.
- Du Ping, Huang Dongding, Wang Zeshan. Ordnance Technology, 2005(4): 465-468.
- [59] 吕淑然, 黄文尧. 低爆速炸药震源药柱的配方研究[J]. 爆破器材, 2002(5): 16-19.
- Lü Shuran, Huang Wenyao. Explosive Materials, 2002(5): 16-19.
- [60] 陈双华, 崔若飞. 低爆速细长型震源药柱提高地震勘探分辨率[J]. 中国煤田地质, 2002(4): 59-61.
- Chen Shuanghua, Cui Ruofei. Coal Geology of China, 2002(4): 59-61.
- [61] 杜安利, 王迎春, 王洁. 聚能装药技术的发展及应用[J]. 飞航导弹, 2012(2): 85-89.
- Du Anli, Wang Yingchun, Wang Jie. Cruise Missile, 2012(2): 85-89.
- [62] 李名能. 聚能装药原理和应用[J]. 爆破, 1992(1): 58-62.
- Li Mingneng. Explosives, 1992(1): 58-62.
- [63] Poulter T C. High explosive disk-shaped charge for seismic exploration: US, 2656003[P]. 1953-10-20.
- [64] 赵殿栋, 谭绍泉, 张庆淮, 等. 地震勘探中特殊震源的研制与应用[J]. 石油地球物理勘探, 2001(4): 383-389.
- Zhao Diandong, Tan Shaoquan, Zhang Qinghuai, et al. Oil Geophysical Prospecting, 2001(4): 383-389.
- [65] 山东机器厂. 微破坏聚能震源弹: 中国, 94240306.1[P]. 1995-01-18.
- Shandong Machinery Factory. Micro-shaped vibrator bomb damage: China, 94240306.1[P]. 1995-01-18.
- [66] 辽宁庆阳化学工业公司民爆器材研究所. 聚能震源弹: 中国, 99222457.8[P]. 2000-02-16.
- Liaoning Qingyang Chemical Industry Corporation Explosive Materials Institute. Shaped vibrator play: China, 99222457.8[P]. 2000-02-16.
- [67] 辽阳庆阳爆破器材厂. 高能宽频震源药柱: 中国, 200320105133.2[P]. 2004-10-13.
- Liaoyang Qingyang Explosives Factory. Energy broadband seismic charge: China, 200320105133.2[P]. 2004-10-13.
- [68] 湖北凯龙化工集团股份有限公司. 聚能震源药柱: 中国, 02284316.7[P]. 2004-02-04.
- Hubei Kailong Chemical Group Co, Ltd. Shaped seismic charge: China, 02284316.7[P]. 2004-02-04.
- [69] 中国石化集团胜利石油管理局地球物理勘探开发公司. 横波勘探特种震源药柱: 中国, 200320107466.9[P]. 2005-01-12.
- China Sinopec Shengli Petroleum Administration Bureau Geophysical Exploration and Development Corporation. Wave exploration special seismic charge: China, 200320107466.9[P]. 2005-01-12.
- [70] 中国石化集团胜利石油管理局地球物理勘探开发公司. 超速聚能震源药柱: 中国, 200320107465.4[P]. 2005-04-06.
- China Sinopec Shengli Petroleum Administration Bureau Geophysical Exploration and Development Corporation. Speeding shaped seismic charge: China, 200320107465.4[P]. 2005-04-06.
- [71] Hawkins J E, Pugh W E, Tulsa. Apparatus for generating seismic waves: US, 2757750[P]. 1948-10-08.
- [72] 刘怀山, 王玉岭. 组合爆炸法在高分辨率地震勘探中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 1990(6): 734-743.
- Liu Huaishan, Wang Yuling. Oil Geophysical Prospecting, 1990(6): 734-743.
- [73] 王卫华. 纵波勘探中的炸药激发方式分析[J]. 石油地球物理勘探, 1999(3): 249-259.
- Wang Weihua. Oil Geophysical Prospecting, 1999(3): 249-259.
- [74] 吕公河. 弱弹性介质中炸药震源大基距面积组合激发效果分析[J]. 石油地球物理勘探, 2011(6): 851-855.
- Lü Gonghe. Oil Geophysical Prospecting, 2011(6): 851-855.
- [75] Silverman D, Tulsa. Explosive charge unit: US, 3150590[P]. 1964-09-29.
- [76] Lang H M. Controlled velocity explosive charge for seismic exploration: US, 3244099[P]. 1966-04-05.

(责任编辑 吴晓丽)



SCIENCE &amp; TECHNOLOGY REVIEW

## 《科技导报》“卷首语”栏目征稿

“卷首语”栏目每期邀请一位中国科学院院士和中国工程院院士就重大科技现象、事件,以及学科发展趋势、科学研究热点和前沿问题等,撰文发表个人的见解、意见和评论。本栏目欢迎院士投稿,每篇文章约2000字,同时请提供作者学术简历、工作照和签名电子文档。投稿邮箱:kjdbbjb@cast.org.cn。