

· 研究报告 ·

基于邻井反射的偶极横波远探测验证方法^{*}

苏远大 魏周拓[†] 唐晓明

(中国石油大学(华东) 地球科学与技术学院 COSL-UPC 声学测井联合实验室 青岛 266580)

摘要 偶极横波远探测技术已成为探测井外地质构造的一种重要测井技术, 需要针对偶极横波远探测的验证迫在眉睫。本文利用三维有限差分数值模拟方法, 对比和分析了地层界面和相邻充液邻井产生的反射横波幅值的差别, 结合现场实例, 提出了偶极横波远探测成像测井的验证方法。在此基础之上, 进一步分析了不同反射邻井结构时, 反射横波幅度的变化情况, 结果表明, 采用多井联合方式可以有效的增加反射波的幅值, 减小非共面产生的散射效应影响。最后, 初步建立了两口试验井, 测试数据处理结果与理论分析结果吻合, 为下一步实验井方案的优选和完善提供了理论和数据支持。

关键词 偶极横波, 远探测技术, 有限差分, 试验井

中图分类号: TE19 文献标识码: A 文章编号: 1000-310X(2014)01-0029-06
DOI:10. 11684/j. issn. 1000-310X. 2014. 01. 005

A validation method of dipole shear-wave remote reflection imaging from adjacent borehole reflection

SU Yuanda WEI Zhoutuo TANG Xiaoming

(COSL-UPC Allied Borehole Acoustic Laboratory, School of Geosciences, China University of Petroleum(Huadong), Qingdao 266580, China)

Abstract Dipole shear-wave remote reflection imaging technology has become an important logging technology detecting near-borehole geologic structure, therefore validation of dipole acoustic reflection imaging is needed. This paper used 3D finite difference numerical simulation method to compare and analyze difference of reflected shear wave amplitude from the near-borehole formation interface and the adjacent fluid-filled borehole. And then, this paper proposed a validation method of dipole shear-wave remote reflection imaging combining field case. On this basis, the paper further analyzed the change of reflected shear-wave amplitude for different adjacent borehole structure. The results show that the multi-well combination can effectively improve amplitude of reflected shear-wave, reduce the scattering effect caused by non-coplanar. Finally, experimental wells have been established, and the field data processing results agreed with that of theoretical analysis, which provides the theoretical and data support for selection and improvement of experimental well next.

Key words Dipole shear-wave, Remote sensing technology, Finite difference, Experimental well

2013-08-12 收稿; 2013-09-03 定稿
^{*} 国家自然科学基金资助(41204070)

作者简介: 苏远大(1978-), 男, 吉林榆树人, 副教授, 博士研究生, 研究方向: 声波测井理论、方法及应用研究。
魏周拓(1983-), 男, 博士。唐晓明(1955-), 男, 教授, 博士生导师。

[†] 通讯作者: 魏周拓, E-mail: zhout_wei@aliyun.com

1 引言

偶极横波远探测技术是近年来声波测井中的一个研究热点,它是利用偶极声波探测仪器来发射和接收地层深部的反射信号,通过偏移成像来获知井旁地质构造的横向延伸范围和发育情况^[1-6],它把常规声波测井的测量范围从井周一米左右提高到数十米,现已成为探测井外地质构造的一种重要的测井技术,尤其在致密缝洞性和页岩等非常规储层勘探和开发中发挥了重要作用。目前国内各大油田高度重视,针对现有常规偶极或交叉偶极测井仪器的处理技术和软件也在各油田陆续推广应用。

随着人们对偶极横波远探测的不断研究和认识,希望进一步提高远探测测井的有效性和测量范围,研发看得更远、更清晰的专用偶极横波远探测仪器^[7]也提上了议事日程。仪器的研发,就需要专门用来检验仪器测量效果的验证方法,既能检验仪器实际测量的径向探测深度,又能有效验证偶极横波远探测的方位指向性特征,因此,针对偶极横波远探测技术的验证迫在眉睫。在这样的实际需求

下,本文利用三维有限差分数值模拟方法^[8],首先对比和分析了当井旁存在地层界面和邻井时产生的反射横波差异,结合油田实例,提出了偶极横波远探测成像测井的验证方法,在此基础上,进一步分析了当邻井结构不同时,反射横波的幅度变化情况,最后对试验井的测试结果进行了分析。

2 偶极横波远探测验证方法的提出

图 1 给出了偶极声源激励下的井旁反射体计算模型示意图,图中仅显示了三维空间中的二维 xOz 截面,井旁反射体的走向始终设置为垂直于 xOz 面,计算模型大小为 $x = 12\text{ m}$, $y = 6\text{ m}$, $z = 8.0\text{ m}$,充液井孔半径为 0.1 m ,测量主井井轴中心位于空间坐标 $(1, 3, 1)$ 处,模拟中偶极声源中心频率为 3 kHz ,声源振动方向始终为 y 向,声源采用了以高斯函数为基础的力源来模拟井中偶极声源^[9-10],采用的弹性参数见表 1 所示。在以下计算中,当井旁为地层界面时,靠近测量主井的地层设为 3 号介质,远离井孔的地层设为 4 号介质,对于井旁反射体为充液井孔时,地层设置为 3 号介质,如无特殊说明,均按以上说明进行。

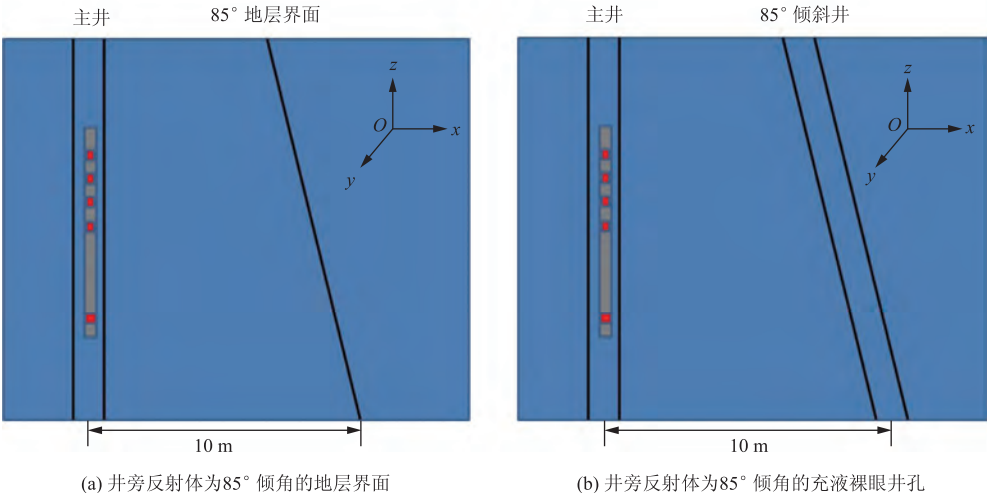


图 1 井旁存在反射体时的计算模型示意图
Fig. 1 Calculation model with near-borehole reflector

表 1 井孔流体和地层弹性参数

Table 1 Borehole fluid and formation elastic parameters			
介质	纵波速度 (m/s)	横波速度 (m/s)	地层密度 (kg/m ³)
1 井孔流体	1500	—	1000
2 钢性套管	5930	3250	7500
3 地层介质	3800	2000	2150
4 地层介质	4500	2800	2500

文献[10]中开展了缩小比例模型井(10:1)的偶极横波远探测测量实验^[10],主要通过设置不同弹性性质的地层界面来实现反射横波的测量,但在实际的 1:1 实验井中,建立具有一定深度,且距测量主井足够远的地层界面,本身就非常困难,且施工成本巨大,基于以上考虑,本文以井间地震的思路为出发点,重点考察井间的反射方式。图 2 给出了反

射体分别为地层界面(见图 1(a))和充液裸眼井孔时(见图 1(b))有限差分计算得到的阵列波形,源距范围为 2.0~4.1 m,图中线条所示为理论计算的 SH 反射横波到时曲线。根据文献[6]的结论表明偶极声源在充液井孔中工作时,除了激发出沿井传播的直达弯曲波外,还会向地层中辐射纵波(P)和横波(S),当偶极振动方向与井旁反射界面走向平行时,在声源振动面内会产生纯的 SH 反射横波^[6]。从图 2 中可以看出,首先到达接收器的是波形中幅度最大沿井传播的弯曲波,最后到达的是 SH 反射横波(其它的偶极振动方向计算结果本文未作讨论),相对于直达的弯曲波,SH 反射横波幅度较小。对比图 2(a)和图 2(b)可以看出,虽然后者的 SH 反射横波幅值仅为前者的三分之一,但其反射波幅度仍旧可观,事

实上,从以下现场实例中可以看出,即便如此,仍可以通过后续的数据处理对反射波进行有效提取。

图 3 给出了四分量交叉偶极横波远探测邻井成像结果。图 3(a)为测量主井和反射邻井的位置关系示意图,反射邻井井斜角约为 80°。图 3(b)给出了 SH 和 SV 反射横波(当偶极振动方向与井旁反射界面走向垂直时)的成像结果,从图中可以清楚地看到邻井的空间位置(图中箭头所指)以及井斜角,同时对比 SH 和 SV 反射横波成像结果,可以确定邻井相对测量主井的空间方位为 SSE10°,也印证了上述结论。通过以上分析,可以利用邻井反射来达到偶极横波远探测成像测井仪器的测试和远探测处理方法的验证,不仅可以避免工程实现的困难,同时也可节约成本。

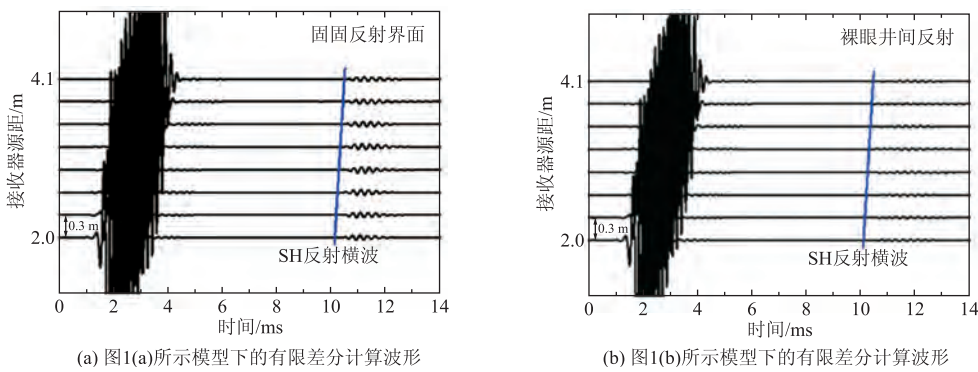


图 2 偶极振动方向平行于反射体走向时,测量得到的充液井孔中阵列波形

Fig. 2 When polarization direction of dipole source is parallel to the reflector strike, array waveform received in a fluid-filled borehole

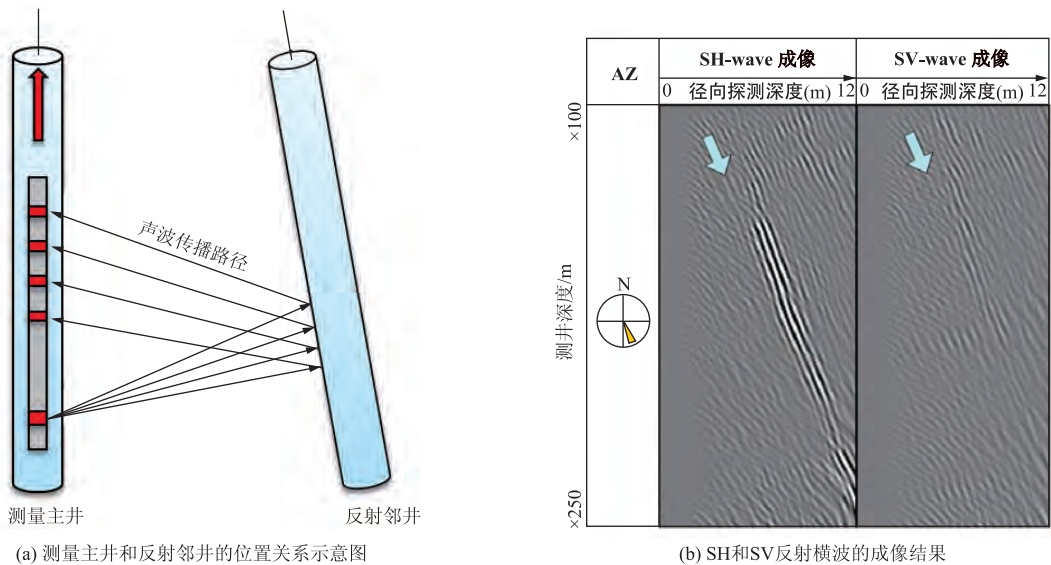


图 3 四分量交叉偶极横波远探测邻井成像结果图

Fig. 3 Imaging result of four-component cross dipole shear-wave remote detection

3 反射邻井结构对反射横波的影响

依据上述验证思路,本文来进一步分析当邻井为胶结良好的套管井时、当邻井具有一定倾斜角时,以及当邻井为多井联合时,测量主井中反射横波的幅度变化情况。为了简化起见,邻井的井轴始终处在 yOz 平面内,模型其它相关参数设置同上。这里要特别说明的是,邻井是沿着 y 轴方向倾斜(与 z 轴存在夹角),意味着测量主井和反射邻井将不再共面。

图 4 分别给出了以上三种情况下有限差分模拟计算得到的全波波形(便于比较,三者幅度范围相同)。结合图 2 的计算结果,可以看出,除了主井与邻井发生非共面倾斜以外,其它四种情况下,SH 反射横波幅值都较为明显,其中第一种和第三种情况对应的反射波信噪比最好,这也保证了后续实验测量结果的可靠性。对于邻井发生非共面倾斜时(图 4(b)),虽然在所示源距范围内,仍旧可以看到反射波特征,但此时其波至不再明显、持续周期变长、幅值大幅降低,而且这种现象会随着接收器源距的增加,变得更为显著。这主要是由于非共面程度的加大(倾斜角越大),辐射进入地层中的横波在邻井发生反射的几率变小。在源距较短时,波的反射占主导地位,源距加大,反射变得越来越微弱,散射随之更为明显,这不利于后续的反射波提取和偏移成像。因此,图 4(c)所示多井联合方式可以作为候选方案,既可以增加反射波的幅值(类似于套管井的情况),又可以减小非共面产生的散射现象。

图 5 给出了接收器源距为 2.0 m 时,上述五种情况下对应的波列对比图。为了便于对比,图中同时还显示了均匀地层时的波列(黑色线条所示)。图中虚线框形区域所示为 SH 反射横波,可以看出,当邻井为三井组合方式时,反射横波波至明显、波列持续周期适中、幅度最大。

4 试验井测试结果分析

综合以上分析,我们建立了如图 6 所示的偶极横波远探测成像测井 1:1 试验井。该井钻遇地层相对疏松,钻井深度为 100 m,测井目的层段深度 30 m。测量井段由三部分构成,上部是 15 m 的钢套管,中部为 10 m 的玻璃钢管,下部为 5 m 的裸

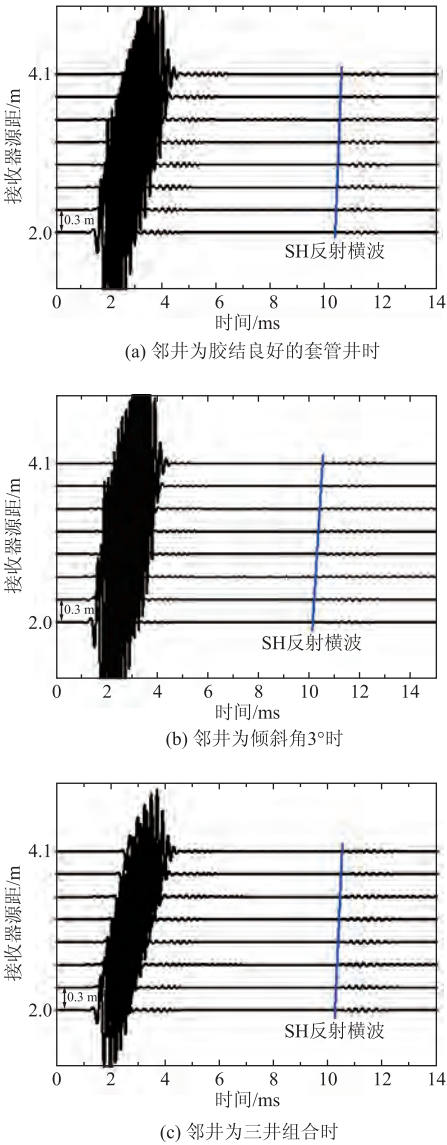


图 4 偶极振动方向始终指向 y 轴时,测量主井中接收到的阵列波形

Fig. 4 When polarization direction of dipole source points y -axis, array waveform received in a fluid-filled borehole

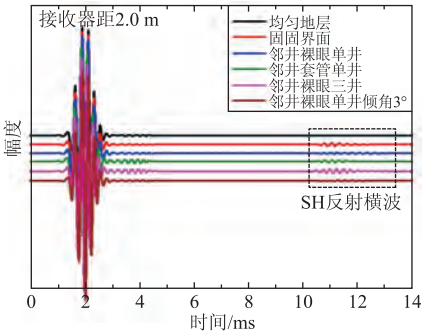


图 5 接收器源距为 2.0 m 时,上述五种情况下对应的波列对比

Fig. 5 Waveform contrast of source-to-receiver spacing 2.0 m

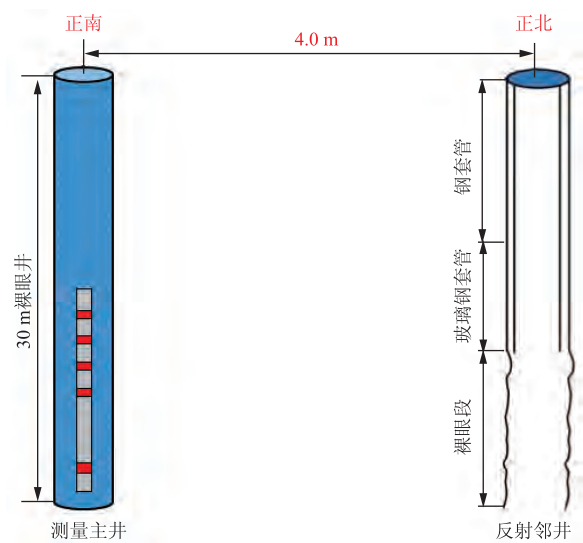


图6 偶极横波远探测成像测井的1:1试验井示意图
Fig.6 Test well(1:1) of dipole shear-wave imaging logging

眼井孔。两口井所构平面南北走向,井轴之间的垂向距离为4 m。图7给出了试验井偶极横波远探测成像处理成果图。图中第一道仅显示了原始的 xx 偶极单分量数据,可以看出,波列中主要是沿井传播的直达弯曲波,在接箍处隐约可见反射波,而其它位置无法直观看到反射波出现。通过四分量的偶极横波远探测数据处理,得到了如图所示南北向(第二道)和东西向(第三道)的SH反射横波成像结果,可以明显看出,南北向的整个套管部分井段清

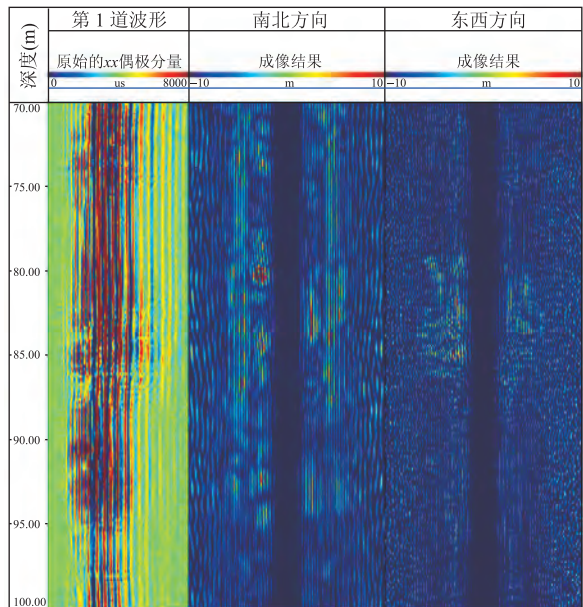


图7 试验井的偶极横波远探测成像处理成果图
Fig.7 Dipole shear-wave imaging result of test well

晰可见,径向深度约为4 m,与实际情况一致。东西向的成像结果却没有,这也说明了偶极横波远探测的方位指向性和成像结果的可靠性。对于最下部的裸眼井段,在南北向没有明显成像结果显示,这主要是因为该试验井钻遇地层较为疏松,井深很浅,相对衰减较大。相比于图3所给出千米井深的裸眼井间成像结果,可以明显看出。综上可知,初步的试验井测试数据处理结果与上述理论分析结果吻合,为下一步试验井方案的优选和完善提供了重要的理论和数据支持。

5 结论

通过分析井旁存在地层界面和充液裸眼邻井两种情况下的井孔声场,同时结合现场实例分析结果,本文提出了可以通过设置一定横向距离邻井的方式来实现偶极横波远探测成像测井仪器的测试和远探测处理方法的验证思想。邻井发生非共面倾斜时,反射波波至不再明显、反射波持续周期变长、反射波幅值降低,随着接收器源距的增加,这种趋势变得更为显著,不利于后续的反射波提取和偏移成像。然而,通过设置套管或者进行多井联合,可以有效增加反射波的幅值,减小非共面产生的散射效应,可作为偶极横波远探测测井验证候选方案。以上的分析结果为下一步检验偶极横波远探测成像测井仪器的实际径向探测深度和方位指向性提供了理论基础。

参 考 文 献

[1] TANG X M. Imaging near borehole structure using directional acoustic wave measurement [J] . Geophysics, 2004, 69, 1378-1386.

[2] PATTERSON D, TANG X M, RATIGAN J. High-resolution borehole acoustic imaging through a salt dome[C]. Society of Exploration Geophysicists Annual Meeting, Extended Abstracts, 2008: 319-323.

[3] TANG X M, PATTERSON D. Single-well S-wave imaging using multi-component dipole acoustic log data [J] . Geophysics, 2009, 74(6): 211-223.

[4] BRADLEY T, PATTERSON D, TANG X M. Applying a through-casing acoustic imaging technique to identify gas migration paths in a salt body[J]. First break, 2011, 29(7): 75-84.

[5] 唐晓明,魏周拓. 声波测井技术的重要进展—偶极横波远探测测井[J]. 应用声学, 2012, 31(1): 10-17.

TANG Xiaoming, WEI Zhoutuo. Significant progress of acoustic logging technology: single-well acoustic reflection imaging of a dipole acoustic system[J]. Applied Acoustics, 2012, 31(1): 10-17.

[6] 唐晓明, 魏周拓. 利用井中偶极声源远场辐射特性的远探测测井[J]. 地球物理学报, 2012, 55(8): 2798-2807.

TANG Xiaoming, WEI Zhoutuo. Single-well acoustic reflection imaging using far-field radiation characteristics of a borehole dipole source[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(8): 2798-2807.

[7] 魏周拓, 唐晓明, 苏远大, 等. 利用井中低频偶极横波进行声波远探测的新方法[J]. 地球物理学报, 2013, 56(10): 3572-3580.

WEI Zhoutou, TANG Xiaoming, SU Yuanda, et al. A new acoustic remote sensing method utilizing borehole low-frequency dipole shear wave[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(10): 3572-3580.

[8] WEI Z T, TANG X M. Numerical simulation of radiation, reflection, and reception of elastic waves from a borehole dipole source[J]. Geophysics, 2012, 77(6): D253-D261.

[9] KELLY K R, WARD R W, TREITEL S, et al. Synthetic seismogram, a finite difference approach [J]. Geophysics, 1976, 41: 2-27.

[10] 魏周拓. 博士论文: 反射声波测井数值与物理模拟研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2011.

· 声学新闻和动态 ·

郑海荣研究员获 2014 年度陈嘉庚青年科学奖

2014 年度陈嘉庚科学奖日前在北京发布。中国科学院深圳先进技术研究院郑海荣研究员因其在生物医学超声学和成像仪器领域取得的突出研究成果, 荣获 2014 年度陈嘉庚青年科学奖技术科学奖。

2014 年度陈嘉庚科学奖及陈嘉庚青年科学奖经过推荐、初评、有效候选奖项评审会议、国内外同行专家通信评审、正式候选奖项评审会议和陈嘉庚科学奖基金会第三届理事会第三次会议审查, 评选出 6 项陈嘉庚科学奖获奖项目和 5 位陈嘉庚青年科学奖获奖人。据悉, 相关奖项将于 2014 年 6 月在全国院士大会上由国家领导人颁发。

陈嘉庚科学奖是以我国著名爱国侨领陈嘉庚先生名字命名的科技奖励, 每两年评选一次。陈嘉庚科学奖自成立以来, 已在我国科技界和海内外产生了崇高的声誉和广泛的影响, 对促进我国科学技术的创新与发展起到了很好的激励与推动作用。为了激励更多的青年科技工作者献身科技事业, 陈嘉庚青年科学奖自 2010 年起设立, 旨在奖励做出具有自主知识产权的原创性科技成果、年龄在 40 周岁以下的青年科技人才。共包括数理科学奖、化学科学奖、生命科学奖、地球科学奖、信息技术科学奖和技术科学奖 6 个奖项, 每个奖

项只设一人, 各奖项分别设立评奖委员会, 负责陈嘉庚青年科学奖的初选与评审工作。

郑海荣研究员主要从事生物医学超声和医学成像仪器研究工作, 在非线性超声成像、声辐射力计算方法及声操控技术、多功能成像给药治疗一体化技术等方面做出了开拓性的工作。研发的超声弹性成像肝硬化检测技术实现产业化并获国家医疗器械注册证和欧盟 CE 认证, 进入医院临床使用。发表学术论文 100 余篇(其中 JASA, APL, JCR 等国际期刊论文 60 余篇), 授权专利 20 余项, 多项专利技术实现产业化。目前担任 IEEE Transactions on UFFC 副主编和 Ultrasound in Medicine and Biology, Physics in Medicine and Biology 等多个国际期刊顾问编委、中国《声学学报》编委, 还担任中国声学学会生物医学超声专业委员会副主任委员、中国超声医学工程学会仪器开发专业委员会副主任委员、国家自然科学基金委学科评议组成员等学术职务。郑海荣是 2013 年国家杰出青年科学基金获得者。

(中国科学院声学研究所 李明轩)