

超声技术在有机废水处理中的应用

尚 岩^{1,2},王宝贞¹,王琳¹,彭亚男²

(1. 哈尔滨工业大学 市政与环境工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090 ;

2. 哈尔滨师范大学 化学系, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要 超声技术作为一种新的污染治理技术正在日益受到人们的重视,它具有操作简便,降解速度快等优点,在有毒有害和难降解有机废水处理等方面已显示出巨大潜力,介绍了近年来超声技术在有机废水处理中的研究进展。

关键词 超声波 有机废水 冰处理

中图分类号 X703

文献标识码 A

文章编号 1672-0946(2002)06-0639-05

Applications of ultrasonic technique in organically wastewater treatment

SHANG Yan^{1,2},WANG Bao-zhen¹,WANG Lin¹,PENG Ya-nan²

(1. School of Municipal & Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China ;

2. Department of Chemistry, Harbin Normal University, Harbin 150080, China)

Abstract : As a new method, ultrasonic technique is getting more and more people's attention now, especially in the treatment of poisonous and difficult to degradation organical waste water. Gave a comprehensive review on the applications and recent progresses of ultrasonic in wastewater treatment.

Key words : ultrasonic ; organical waste water, water treatment

水资源的可持续利用是所有自然资源可持续开发利用中最为主要的一个问题。各国科研人员在多方面展开了污水的高级处理方法和技术,以期在较短的时间里对难降解毒性有机污染物实现完全无害化,不产生二次污染的处理。因而探索非常规降解有机污染水体技术的研究已成为国际上科技界关注的焦点问题。利用超声波降解水中的化学污染物,尤其是难降解的有机污染物是近几年来发展起来的新型水处理技术^[1-3]。

1 超声波工作原理

超声波是指频率高于 20 kHz 的声波。当一定强度的超声波通过媒体时,会产生一系列的物理、

化学效应,例如 超声波在水溶液中会产生超声空化现象,并产生瞬时高温(5000K)、高压(5.0×10^4 kPa)。超声空化是液体中的一种极其复杂的物理化学现象,目前还未被彻底弄清。它主要是指液体中的微小泡核在超声波作用下被激化,表现为泡核的振荡、生长、收缩及崩溃等一系列动力学过程。泡核在破灭时将产生极短暂的强压力脉冲,并在泡核周围微小空间产生局部热点,产生高温高压,数微秒种后,热点随之冷却。超声空化发生时,液体内部会产生强烈的冲击波和很高的剪切力——时速达 400 km/h 的射流,施加于液体中的物质上,产生一些高活性的自由基,如 $H\cdot$ 和 $\cdot OH$,并进而形成游离态氧及 H_2O_2 。溶于水中的有机物与空化作用产生的自由基和(或) H_2O_2 发生一系列的反应,从

而使有机污染物直接分解或氧化降解,这就为一般条件下难以实现的化学反应提供了一种非常特殊的物理化学环境,打开了新的化学反应通道。

2 超声技术应用研究

早在 1927 年就有超声化学效应的报道^[4],美国学者 Richards 和 Loomis 在 Princeton 大学化学实验室发现超声波有加速二甲基硫酸酯的水解和亚硫酸还原碘酸钾反应的作用,但这一发现并未引起化学界的重视。声解有机物最早报道出现在 1955 年,Zechmeister 等证实卤代烃、杂环以及苯酚能被超声裂解^[5]。20 世纪 90 年代以来,国内外开始研究将超声波空化技术应用于水污染控制,主要应用于含有难降解的有毒有机污染物的治理方面。此技术集高级氧化技术、焚烧、超临界氧化等多种水处理技术的特点于一身,降解条件温和,降解速度快,适用范围广,可以单独与其他水处理技术(光催化,Fenton 试剂,臭氧等)联合使用,使其在环境保护领域的应用发展较快。作为一种新的废水处理技术,已有大量的实验室基础研究成果^[6-7],并有部分进入了实际应用,被认为是一种有前途的、环境友好的废水处理技术。本文拟对近年来超声波技术在有机废水处理方面的研究与应用作一综述。

2.1 对卤代烃的降解

Cheung^[8]用 Heat Systems W-385 均匀超声波对低浓度的 CH_2Cl_2 , CCl_4 声解表明:在 $10 \sim 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的范围内,超声波对这些化合物的降解非常有效。Kruger 等^[9]研究发现,地表水中以 CH_2Cl_2 为主的高挥发性卤代物在 60 min 内几乎可全部被超声降解。而且水体中存在的无机物和气体对氯代物的降解起了很大作用。 CH_2Cl_2 的降解率与超声波强度、 CH_2Cl_2 初始浓度以及样品体积有关。然而,无论是地表水还是去离子水中的 CH_2Cl_2 ,其降解率与温度($15 \sim 30^\circ\text{C}$)和所使用的高频频率(361,620 和 1086 kHz)无关。InezHua^[10]用频率为 20kHz,输出功率为 135 W 的超声波对氩气饱和溶液中的 CCl_4 进行辐射,发现主要发生的是自由基反应,产生 $\cdot\text{CCl}_3$ 、 $\cdot\text{Cl}$ 和 Cl_2 。且低浓度时的 CCl_4 ($1.95 \times 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 比高浓度时 ($1.95 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 反应速率常数大。CFC113 和 CFC11 同样可被超声波很快降解。在 5°C 、20 kHz、160 W 的超声波作用下 CFC 降解率比 10°C 时略高,6 min 内所有的 CFC11 全部被降解^[11]。Zhang Guangming 用 20 kHz,30.8 W/cm^2 的超声波处理 CCl_3NO_2 、 CCl_3N 以及 PhBr 的

混合液,其降解常数与单独处理三种化合物的速率常数相差甚微,这说明用超声技术处理混合体系是可行的^[12]。以上这些卤代烃的降解均为(假)一级反应^[9],且反应过程中 pH 值下降,说明有 HCl 或 HF 生成^[13]。

2.2 对酚类的降解

1962 年,Lure 等研究了 $25 \sim 500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的酚在高频率超声波(800 kHz)的辐射下声氧化,发现酚的氧化产物最初是由多羟基酚组成,进一步氧化产生醌类,最终生成不溶性酚类。高频超声波(800 kHz)更有利于酚在水溶液中的氧化,这意味着在酚的声解过程中空化并没有发生作用。温度升高,酚的声氧化率降低,这是由于高温时酚在空气中的溶解度下降的缘故。向体系中引入催化剂,如活性 LaneyNi,可提高处理效果。Chew 向 350 mL 的废水中投加 1000 mg 该催化剂,在 $83.3 \text{ W}/\text{cm}^2$ 强度的超声波作用下,可除去 78% 的 COD。如用 O_3 和 O_2 混合气体替代空气,3 h 后,COD 去除率为 95%。Mizera 等在电化氧化处理含酚废水时发现,如果无超声存在,只有 50% 的分解率。如在含酚 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 及 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{NaCl}$ 的废水中,使用 25 kHz、 $10^4 \text{ W}/\text{m}^2$ 的超声处理时,可有 80% 的酚被氧化成顺丁烯二酸^[4]。日本学者 Okouchi 等^[5]1991 年采用频率可调的超声波对苯酚进行降解表明:200kHz 的频率最有效,超声时通 O_2 效果最好,其次是空气、 He 、 N_2 。苯酚在超声波辐射下的降解类似于臭氧氧化过程。

清华大学的郝红伟等人^[16]用自行研制的 1.7 MHz 高频自激式超声发射仪对 4-氯酚进行了辐射降解,效果良好,4-氯酚被直接无机化,无其他新物质生成,属一级反应,且超声波的空化效应起主导作用。Aniruddha B. 等人^[17]用超声技术对 2,4,6-三氯酚(TCP)进行降解处理,在没有催化剂时,随声强的提高,TCP 的降解率也随之提高。但向体系中引入 TiO_2 做催化剂时规律恰恰相反,这是因为催化剂吸附了一部分 TCP 而使 TCP 的降解率下降,且 TCP 的降解似乎只发生在液相中,而固体颗粒在整个降解过程中只发挥了物理作用,即提供了更多的表面空化泡的载体。五氯酚(PCP)由于其产量大毒性高而广受关注。Gondrexon 等^[18]利用三级相同反应器串联的超声反应器连续 60 min 处理初始浓度为 $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 PCP,其降解率可达 80% 以上。Petrier 等^[19]研究发现,通空气、 O_2 、Ar 时的主要声化学转化是 $\text{C}-\text{Cl}$ 键快速断裂并释放出氯离子。溶液在被空气和 O_2 饱和时,PCP 矿

化成 CO_2 , 被 Ar 饱和时生成 CO, 曝气条件下有 NO_2 、 NO_3 生成。通 O_2 时 PCP 的降解和 Cl^- 生成速度比通空气快, 其降解伴随着毒性的降低。有 CCl_4 存在时 PCP 的降解比单纯 PCP 的降解速度快, 这是因为 CCl_4 声解时有 HClO 生成, 加速了 PCP 的分解^[10]。对硝基酚主要在空化气泡的热层脱硝基生成热解产物 H^+ 、 NO_3^- 、 NO_2^- , 同时自由基反应产生对苯醌、4-硝基儿茶酚、双氧水、甲酸、甲酸盐等, 但产物量小于热解产物。PNP 是同其他净水技术一样的手段^[20]。其降解不受砂子和 Fe_2O_3 颗粒的影响^[21]。

2.3 对醇类的降解

乙醇蒸气压低, 容易挥发进入空气泡, 在空气泡内或界面区域热解。因此, 热解是乙醇降解的主要途径。产物有 CH_4 、 C_2H_4 、 C_2H_6 , 自由基反应只占很小一部分。甲醇的水溶液在 1 MHz 的超声波辐射下能 Ar 产生 H_2 、 HCHO 、 CO 、 CH_4 以及少量的 C_2H_4 、 C_2H_6 , 通 O_2 时产生 CO_2 、 CO 、 HCOOH 、 HCHO 、 H_2O_2 以及少量的 H_2 ^[22]。甲醇与水的混合比例不同, 产物的量也不同。

2.4 对醛类的降解

华东理工大学环境工程系的李翠颖^[23]对超声波降解水溶液中的甲醛进行了研究试验。采用的是超声波振子与被处理液间接接触的实验装置。甲醛能够达到较高的降解率, 但反应速度较低, 其原因是, 甲醛与水的亲和力大, 不易进入空化气泡内, 反应较难进行。随辐射时间的延长其降解率直线上升, 在 200kHz, 200W 的超声场作用 4 h 后可达到 90% 左右。碱性有利于甲醛的降解。溶液中溶解的气体种类对降解有一定的影响, 降解速率顺序为 O_3 > 空气 > N_2 , 反应符合一级反应动力学模式。

2.5 对芳香族化合物的降解

在水污染物中, 氯苯类有机物是美国环保局重点控制的 129 种优先污染物, 我国也将氯苯列入水中优先控制污染物黑名单^[24]。Visscher 等^[25]用 520 kHz 频率的超声波辐射苯、乙苯、苯乙烯和邻氯甲苯溶液, 这四种物质的超声降解均为一级降解反应。同济大学陈伟等^[26]研究了超声辐射工艺降解水中氯苯的效果和影响因素。研究指出, 首先, 几种浓度下氯苯经一定时间的超声辐射, TOC 去除率均低于氯苯的降解率, 说明氯苯的降解过程中有中间有机产物(如 CO 、 C_2H_2 、 CO_2 、 HCl (少))生成, 其他文献^[27]也指出, 氯苯超声降解的中间产物还有微量的苯、甲苯、苯乙炔和氯酚; 其次, 溶液的 pH 值

影响氯苯在水溶液中的存在形式, 但氯苯具有疏水性, 易于挥发进入空化泡内直接进行高温热解, 因此, 氯苯在溶液中的存在形式对超声降解影响不大; 再次, 溶液中溶解气体种类不同, 不仅影响超声空化过程中空化泡崩溃时产生的高温高压, 而且气体本身可能参与其间反应过程。其影响顺序依次为: $\text{Ar} \geq \text{O}_2 \geq \text{空气} > \text{未曝气}$ 。此外, 还对氯苯超声降解的机理进行了探讨, 认为以空化泡内直接热解反应为主。

2.6 对有机磷的降解

有机磷农药废水处理大多采用生化法^[28-29]和光催化降解法^[30]。但有机磷农药废水中含有对微生物有抑制且难降解的污染物, 生化处理后的废水中有机磷的含量仍很高, 光催化处理需水溶液透明才有利于光的吸收, 而多数废水是浑浊的, 且还存在催化剂难回收等问题。超声降解有机磷的原理是, 有机磷被空化效应产生的 $\cdot\text{OH}$ 等自由基将 P-S 键和 P-O 键断裂, 最后形成 PO_4^{3-} , 断裂形成的有机物碎片再被自由基完全氧化生成 SO_4^{2-} 、 H_2O 和一些矿物酸^[7]。有机磷的降解与其结构有关, 相同条件下按照乙酰甲胺磷(硫赶磷酸酯) > 敌敌畏(磷酸酯) > 乐果(硫逐硫赶磷酸酯) > 甲基对硫磷(硫逐磷酸酯)。 H_2O_2 和 Fe^{2+} 能加快降解速率^[31]。台州师专化学系的钟爱国^[32]研究用功率超声波诱导降解低浓度乙酰甲胺磷农药模拟废水, 也取得了类似的研究结果。用 O_2 饱和和初始浓度为 $1.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的乙酰甲胺磷溶液, 控制 $\text{pH} = 2.5 \sim 10.8$, 加入 $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 Fe^{2+} , 温度控制在 $(30 \pm 7)^\circ\text{C}$, 用 $40 \text{ W}/\text{cm}^2$ 的超声波辐射 1 h, 乙酰甲胺磷的平均热解率为 99.9%。北京化工大学的孙红杰^[33]对甲胺磷农药废水进行超声处理时采用的是浸入式变幅杆。研究结果表明甲胺磷的降解率与超声反应时间基本呈线性关系, 具有一级反应动力学特征, 酸性条件有利于降解, 充入空化气体对甲胺磷降解有利, 其影响排序为: 空气 > Ar > O_2 > N_2 。马拉磷农药也可被超声波降解, 其蒸气压很低, 不可能进入空化气相, 同 PNP 声解类似, 马拉磷是在崩灭的空化泡界面区热解, 自由基降解是第二位的。在 20 kHz, 75 W 超声波辐射下, $82 \mu\text{M}$ 的马拉磷溶液 30 min 内 pH 从 6.1 下降到 4.1, 2 h 内所有的马拉磷全部降解, 产物均为无机小分子。

2.7 处理制革、印染废水有机物

在制革加工过程中, 脱脂、脱毛、软化、染色和加脂等工序所产生的废水中含有大量的有机物, 一般未经处理的制革废水中的 COD 值可高达 4000

~ 6000 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ [34-35]。四川大学的李国英等人[36]采用超声波强化混凝土沉淀法处理制革废水。当只有超声波作用于废水 60 s 时, COD 去除率为 40.6%, 当引入混凝剂的总浓度为 100 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, COD 的去除率最高, 可达 73.2%, 比不用超声波时提高 10% 以上。因此, 超声波技术用于混凝沉淀处理制革废水有明显的强化作用。

上海大学环境科学与工程系的华彬[37]用超声波技术降解酸性红 B 废水。延长超声作用时间, 提高反应温度对酸性红 B 的降解有利。研究表明, 当溶液中 NaCl 投加量由 0 增加到 1 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 酸性红 B 降解率从 43% 增加到近 90%, 进一步增加溶液中 NaCl 的浓度对酸性红 B 降解率影响不大。河北科技大学的祁梦兰[38]用声化学氧化法 - SBR 法处理染料废水。结果表明, 声化学氧化法作为靛蓝染料废水生物处理前的预处理是有效的。利用靛蓝染料废水中含有的亚铁盐做催化剂, 向废水中投加 H_2O_2 为氧化剂, 在超声波作用下, 可使废水可生化性 BOD_5/COD 值由 0.22 ~ 0.28 提高到 0.44 ~ 0.51, 苯胺含量降至 20 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 为生物处理创造了条件。

2.8 对聚合物的降解

国外对超声波降解聚合物研究得很多, 有大量的综述和报道[39], 主要在聚合物化学解聚和合成上。其降解机理主要是主链被空化作用产生的高温高压环境以及水力剪切力作用而断裂, 形成自由基, 自由基之间相互反应形成新的化合物。聚合物的解聚产物很有规律, 分子分布狭小, 纯度高, 在聚合物化学中有很重要的意义。DNA、果酸、酰胺乙烯醇、异丁烯酸以及聚 1,2-亚甲基二醇在氩气饱和和超声, 可检测出有 CO 和 H_2O_2 生成, CO 是聚合物热解的标志。

3 结语

超声波独特的物理化学特性开辟了新的化学反应途径, 可提高反应速率, 对有机物有很强的降解能力, 利用超声空化效应可将水中难降解有机污染物分解为无毒小分子或无机物, 降解速度快, 操作简便, 还可以与其他水处理技术联合使用, 其在污水处理中的作用是不容忽视的, 特别是对毒性高、难降解有机废水的处理, 超声波辐射具有很大的潜力。但在实际应用中, 超声波辐射技术仍存在适用范围小、声能的利用率低等不足之处, 因此, 我们还有大量的工作要做, 以便尽早实现工业化。

参考文献:

- [1] 王建龙, 柳萍, 施汉昌. 声化学在污水控制中的应用现状[J]. 化学通报, 1997, (7), 35 ~ 38.
- [2] 蒋建华. 超声降解水体中化学污染物的研究现状[J]. 环境科学进展, 1998, 6(6) 29 ~ 35.
- [3] MASON T J, CORDEMAND E D. Ultrasonic intensification of chemical processing and related operations [J]. A Review Trans. Chem. E, 1996, 74A 511 ~ 516.
- [4] RICHARDS W. T., LOOMIS A. J. [J] Am. Chem. Soc., 1929, 51 370.
- [5] ZECHMEISTER L. [J] J. Am. Chem. Soc., 1955, 77 2953.
- [6] WA J M, HUANG H S. Livergood C D [J] Environ. Prong., 1992, 11 (3) 1195.
- [7] KOTRONOROU A, MILLS G, HOFFMAN M R. Decomposition of parathion in aqueous solution by ultrasonic irradiation [J]. Environ. Sic. Technol., 1992, 26(7) 1460 ~ 1462.
- [8] MICHAEL H, ASHISH BHATNAGAR, GREG J. Sonochemical destruction of chlorinated hydrocarbons in dilute aqueous solution [J]. Environ. Sic. Technol., 1991, 25(8) 1510 ~ 1512.
- [9] KRUGER O, SCHULZE L. Sonochemical treatment of natural ground water at different high frequencies: preliminary results [J]. Ultrason. Sonochem., 1999(6) 123 ~ 128.
- [10] NEZ Hua, MICHAEL R, HOFFMANN K. Kinetics and mechanism of the sonolytic degradation of CC14: intermediates and byproducts [J]. Environ. Sic. Technol., 1996, 30(7) 846 ~ 871.
- [11] MICHAEL H. Sonochemical destruction of CFC11 and CFC113 in dilute aqueous solution [J]. Environ. Sic Technol., 1994, 28(2) 1619 ~ 1622.
- [12] ZHANG Guangming, INEZ H. Ultrasonic degradation of trichloroacetone, trichloropiridin and bromobenzene: design and matrix effects [J]. Advances in Environmental Research, 2000(4) 211 ~ 218.
- [13] HIRAI K. Decomposition of chlorofluorocarbons and hydrofluorocarbons in water by ultrasonic irradiation [J]. Ultrason. Sonochem., 1996, 3, 205 ~ 207.
- [14] HOFFMAN M R. Applications of semiconductor photocatalysis [J]. Chem. Rev., 1995, 9(5) 59.
- [15] OKOUCHI S, NOJIMA O. Cavitation-induced degradation of phenol by ultrasonic [J]. Wat. Sci. Technol., 1992, 26(9) 2053 ~ 2056.
- [16] 郝红伟, 王海, 陈以方. 高频超声辐射降解水中 4-氯酚的研究 [J]. 环境污染治理技术与设备, 2002, 3(5) 20 ~ 22.
- [17] ANIRUDDHA B P. Ultrasonic degradation of 2,4,6-trichlorophenol in presence of TiO_2 Catalyst [J]. Ultrason. Sonochem., 2001, (8) 227 ~ 231.
- [18] GONDREXON N. Degradation of pentachlorophenol aqueous solutions using a continuous flow ultrasonic reactor: experimental performance and modeling [J]. Ultrason. Sonochem., 1999, 5(4) 125 ~ 131.
- [19] PETRIER C, MICOLLE M. Characteristics of pentachlorophenolate degradation in aqueous solution by means of ultrasound [J]. Environ. Sic. Technol., 1992, 26(8) 1639 ~ 1642.
- [20] COST M, MIUS G. Sonochemical degradation of p-Nitrophenol in the presence of chemical components of natural water [J]. Chemosphere, 1992, 27(9) 1737 ~ 1743.
- [21] KOTRONOROU A, MILLS G, HOFFMAN M R. Ultrasonic irradiation

of p - Nitrophenol in aqueous solution [J] . J. Phys. Chem. ,1991,95 : 3630 ~ 3638 .

[22] 李翠颖,卞华松,张大年 . 超声波降解水溶液中甲醛的研究 [J] . 上海环境科学,2002,21 (1) :12 ~ 14 .

[23] 金相灿 . 有机污染物污染化学 - 有毒污染物污染化学 [M] . 北京 :清华大学出版社,1990 .

[24] VISSCHER A D, KINETIC model for sono - chemical degradation of monocyclic aromatic compounds in aqueous solution [J] . Phy. Chem. , 1996,100 :11636 ~ 11642 .

[25] 陈伟 . 超声辐射降解水中氯苯的研究 [J] . 给水排水,2001,2 :31 ~ 34 .

[26] DRIJVERS D. Sonolysis of chlorobenzene in aqueous solution :organic intermediates [J] . Ultrason. Sonochem. ,1998,5 :13 ~ 19 .

[27] 罗启芳,陈敏,汪求真 [J] . 环境科学,1995,16(6) :14

[28] 陈士夫,赵梦月,陶跃武 . 光催化降解有机磷农药的研究 [J] . 环境科学,1995,16(5) :61 ~ 63 .

[29] HARAOLE K. Photocatalytic degradation of organophorous insecticides in aqueous semiconductor suspensions [J] . Wat. Res. ,1990,24 (1) : 1415 ~ 1417 .

[30] 王宏青,聂长明,徐惟昌 . 超声诱导降解有机磷 [J] . 水处理技术,2001,27(2) :109 ~ 111 .

[31] 钟爱国 . 功率超声波诱导降解水体中乙酰甲胺磷 [J] . 水处理技术,2001,27(1) :47 ~ 49 .

[32] 孙红杰,张志群 . 超声降解甲胺磷农药废水 [J] . 中国环境科学,2002,22(3) :210 ~ 213 .

[33] 高忠柏 . 污水综合排放标准与制革工业废水排放 [J] . 中国皮革,1997,(12) :26 ~ 28 .

[34] 常明,张铭让 . 治理制革污水的技术措施及其发展 [J] . 四川皮革,1987,(5),33 ~ 36 .

[35] 李国英,何有节,石碧 . 超声技术强化处理制革废水中的有机物 [J] . 环境科学,2001,22(5) :102 ~ 104 .

[36] 华彬,陆永生 . 超声技术降解酸性红 B 废水 [J] . 环境科学,2000,21(2) :88 ~ 90 .

[37] 祁梦兰,杜静,郭晓红 . 声化学氧化 - SBR 法处理染料废水 [J] . 河北轻化工学院学报,1997,18(1) :47 ~ 52 .

[38] FELDMAN D. Ultrasound applications in polymer science [J] . Polymer News,1995,20 :138 ~ 144 .

[39] 董丽君,王雨泽 . 含氟废水处理述评 [J] . 哈尔滨商业大学学报 :自然科学版,2001,17(2) :29 ~ 31 .

(上接 638 页)

图 4 是利用此方法对一系列全波列声波测井信号进行检测的结果,纵向的粗线表示由上述方法得到的各波前的到达时刻,从放大后的波形上看,其结果相当准确。

4 结论

本文从分析平滑过渡信号经过子波变换(在调制高斯子波下)后所得到的相关系列的波形特点入手,详细地分析了这种波的起始点检测的困难之所在,提出了一个用于解决该问题的准则函数。利用这个准则函数可以精确地提取滑行纵波、滑行横波及斯通利波的波前。这种波前提取方法不仅对信号的先验知识要求少,有较好的平滑噪声的能力,而且具有精度高、毛刺少、检测效果好等特点,不失为一

种较有效的波前提取方法。

参考文献：

[1] WILLIS M. E, TOKSO. M. N. Automatic P and S velocity determination from full waveform digital acoustics logs [J] . Geophysics,1993,148 :152 ~ 160 .

[2] INGRAM J. D, MORRIS. C. F. Direct phase determination of S - wave velocity from acoustic waveform logs [J] . Geophysics,1997, 50 :24 ~ 31 .

[3] DENNIS J. R, WANG S. Y. Real time shear wave logging [A] . SPWLA Twenty - Fifth Logging Symposium. 1984 .

[4] 朱正亚,程宁亚 . 短源距全波列声波测井的数据处理 [J] . 应用声学,1996,4 :21 ~ 26 .

[5] 朱正亚,周致强 . 全波列声波测井数据的时域处理方法 [J] . 石油物探,1997,2 :33 ~ 36 .

[6] RIOUL O, VETTERLI M. Wavelet and signal proceeding [J] . IEEE. SP. Magazine,1992,10 :172 ~ 178 .

[6] CHENG C H, TOKSOZ M N. Elastic wave propagation in a fluid - filled borehole and synthetic acoustic logs [J] . Geophysics, 1991,146 :35 ~ 41 .