

准确测量水下目标的目标强度

安俊英, 刘彩芬, 徐海亭

(中国科学院北海研究站, 青岛 266023)

摘要: 以测量球和短柱的目标强度为例, 本文根据主动声纳方程数值模拟研究在测量水下目标的目标强度实验中应当满足的平面波入射、稳态和散射远场条件。讨论了满足基本远场条件存在的测试误差和平面波条件; 除了单“亮点”回波外, 根据回波形成机理, 提出多“亮点”回波情况下建立稳态散射入射波脉冲的宽度必须大于窄脉冲回波的扩展宽度。

关键词: 声纳方程, 目标强度, 数值模拟

中图分类号: P733.21⁺4

文献标识码: A

Exact measuring target strength of underwater target

AN Jun-ying, LIU Cai-fen, XU Hai-ting

(Qingdao Acoustics Laboratory, The Chinese Academy of Science, Qingdao 266023, China)

Abstract: Taking a sphere and a short cylinder as instance and based on active sonar equation, numerical simulation means are used to study the plane wave impinge, steady scattering and far field conditions should be satisfied in experiments of measuring the target strength in this paper. The measuring error when just satisfying the basic far field condition and plane wave condition are discussed. Besides single "high light" echo, according to the forming mechanism of echo, puts forward that under the many "high light" echo circumstances, the steady scattering condition is that the incident pulse width must be greater than the extended width of narrow pulse echo.

Key words: Sonar equation; Target strength; Numerical simulation

1 引言

声纳方程在水声工程中是非常有用的, 它把声纳设备、声源、目标和信道联系在一起, 能有效地用于声纳设计、预报声纳探测距离等方面; 也可以用声纳方程确定方程中的未知物理量, 如根据主动声纳方程实验测量水下目标的目标强度。

目标强度与目标的几何形状、材料组成、内部结构及声频率有关, 一个目标的准确目标强度值对声纳设计、目标探测、识别、跟踪是十分重要的。本文根据主动声纳方程用数值模拟方法研究在实验测量目标强度时需要满足的条件。

2 根据主动声纳方程测量目标强度

通常根据主动声纳方程实验测量水下目标的目标强度, 又称 TS 值, 主动声纳方程表示为^[1]:

$$EL = SL - 2TL + TS \quad (1)$$

式中 EL 和 SL 分别是回波级和声源级, TL 是传播损失, 由于这些物理量在实验时测量得到, 因此也就

确定了目标强度。上式中 EL 和 SL 是用声强度定义的, 即:

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{P^2}{\rho c} dt \quad (2)$$

式中 I 为平均声强度, T 为平均时间间隔。所以, 声纳方程通常指强度级声纳方程。

准确测量回波级是非常重要的, 而进行有效测量的依据是目标强度的定义, 它是目标的平面波散射远场折算到离目标声中心 1m 处的声强度 I_{e1} 与平面波声强度 I_i 之比, 并用分贝表示, 即:

$$TS = 10 \log(I_{e1}/I_i) \quad (3)$$

对于任何一个目标, 其远场散射声势函数 φ_s 都可表示为:

$$\varphi_s = f_{\infty} e^{ikr}/r \quad (4)$$

f_{∞} 称目标散射的形式函数 (form function)。所以, 目标强度等于:

$$TS = 10 \log |f_{\infty}|^2 \quad (5)$$

形式函数有严格解的目标很少, 只有球、椭圆、长柱和旋转椭圆等物体的散射声有解析表达式, 对非规则几何体目标, 形式函数需要用数值方法求解, 如积分方程方法、有限元、边界元、 T 矩阵等方法。由形式函数的定义表明, 实验测量目标强度需满足平面波入射、稳态散射和远场 3 个条件。

3 散射远场

目标的散射远场与目标的线度和频率有关, 简

收稿日期: 2000-07-06; 修订日期: 2000-09-29

庆祝上海市声学学会成立 20 周年征文

作者简介: 安俊英 (1977), 女, 辽宁省人, 研究员, 从事水下目标回波特性的研究。

单的回波条件是: $r > D^2/\lambda$ (6)

式中 D 是目标的特征线度, λ 表示波长。

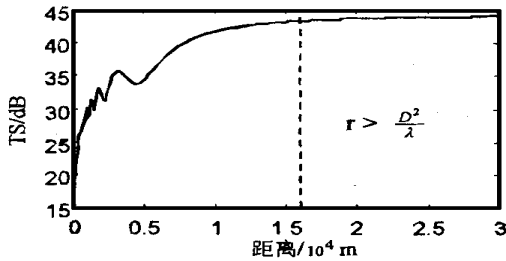


图 1 短柱的回波强度随距离的变化

图 1 是一长 L 为 70m, 半径 a 为 3.5m 的刚性圆柱在正横方向、频率为 5kHz 回波强度 TES 值随距离的变化 ($ka = 41$), 回波强度是用根据物理声学原理的水下目标回波特性理论建模软件 TESSYS 计算得到的。高频时短柱目标强度的公式是^[1]:

$$TS = 10 \log(aL^2/2\lambda) \quad (7)$$

式中 TS 值等于 44.5dB, 它是 TES 的极限值。图中虚线表明了远场的起始距离为 $1.6 \times 10^4 \text{m}$ ($r \sim D^2/\lambda$), 并计算在 $1.7 \times 10^4 \text{m}$ 处的回波强度是 43.5dB, 与目标强度相差 1dB。从图可见, 距离大于 $2.5 \times 10^4 \text{m}$ 才是真正的远场。所以远场的严格判据应当是: $r \gg D^2/\lambda$ (8)

(6) 式称为远场基本判据。

图 2 是用严格级数解计算 ka 分别等于 2、8、25 时, 球的回波强度随距离的变化, 纵坐标表示 $|\varphi_s r|$ 的值, 用 r/a 表示距离。显然它的极限值就是形式函数值, 并且直线区域就是远场。由(6)式计算可得远场的起始距离 r/a 分别等于 1.27、5.1、15.9, 如图中箭头所示, 对应的回波强度与目标强度分别相差约 4.8dB、1.4dB 和 0.4 dB。

这个结果还表明, 球目标的散射近场虽然没有出现相干起伏特性, 但它也不满足球面扩展定律; 对高频反射, $ka \gg 1, r > a$, 汉克尔函数可以用渐近表示式表示, 但并不一定满足远场条件。

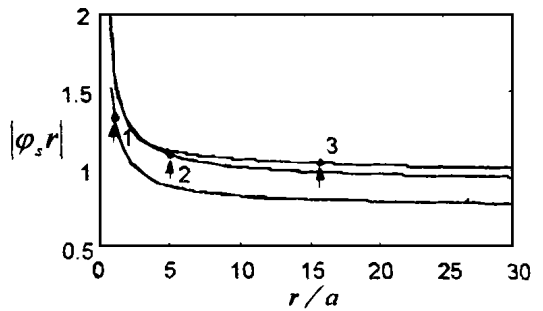
4 稳态散射

进行稳态散射实验实际上是不可能的, 通常的方法是长填充脉冲, 取其回波中的稳态散射部分, 故常用的入射脉冲宽度 τ_0 满足: $\tau_0 > (2D/c)$ 即脉冲的空间宽度必须覆盖目标, 以进行稳态实验。

4.1 单回波“亮点”目标的稳态反射

图 3 是一个正弦波的入射脉冲刚性球的回波波形, 球的半径 a 等于 2m, 单位幅度入射波的频率为 1.5kHz ($ka = 12.5$)。图 4 是不同入射脉冲宽球的回

声学技术



1: $ka = 2$, 2: $ka = 8$, 3: $ka = 25$

图 2 球的回波幅度随距离的变化

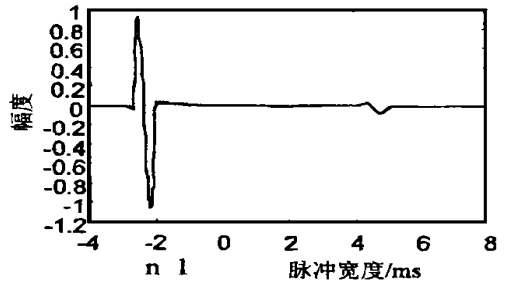
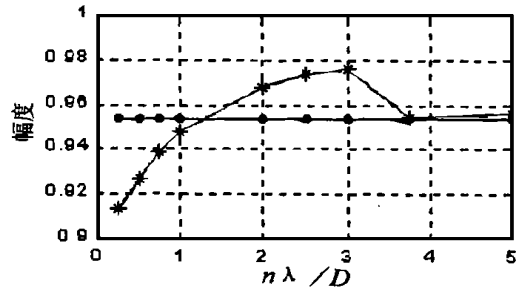


图 3 球的脉冲回波 ($ka = 12.5$)



●: 稳态散射幅度, *: 不同脉冲宽度的散射幅度

图 4 不同入射脉冲宽度刚性球的散射波幅度

波幅度, n 表示填充正弦波的个数。

结果表明, 圆周波的存在使回波在时间上被展宽, 由于高频圆周波的影响较小, 可以认为是单“亮点”回波, 频率越高, 球面上“亮点”的空间扩展越小, 所以即使入射脉冲的空间尺度小于目标的特征尺度, 即 $(n\lambda/D) < 1$ (等于 1 时脉冲宽度刚好覆盖目标, D 为球的直径), 也可以认为是稳态反射, 在这种情况下, 用短脉冲进行测量也会得到满意的结果。

4.2 多回波“亮点”目标的稳态反射

图 5 所示的短柱, 半径等于 1m, 长 4m, 入射平面波在与柱轴夹角为 45° 方向入射, 入射波频率为 3kHz ($ka = 12.5, kL = 50$), 稳态情况下目标强度 $TS_0 = -15.4787 \text{dB}$, 用理论建模方法计算脉冲回波波形如下图所示, 由多“亮点”组成。

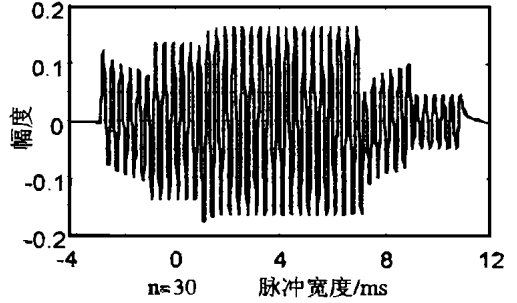
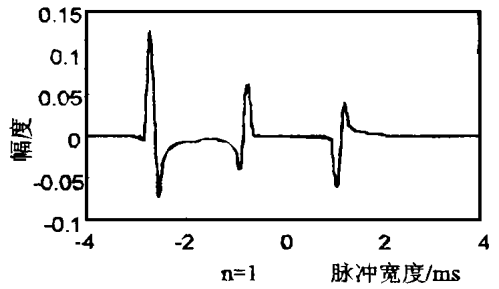
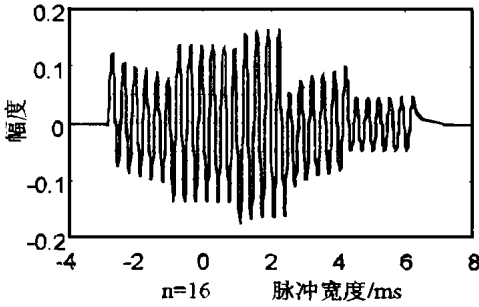
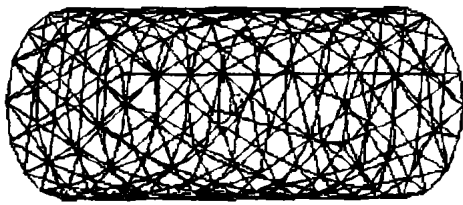
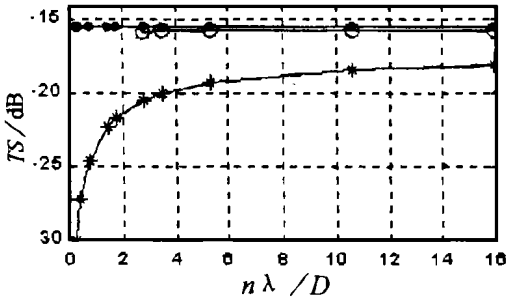


图 5 短柱的脉冲回波

从图可见,回波在时间上被展宽,随着入射波脉冲宽度的增加,逐渐建立起稳态,稳态建立条件是: $\tau_0 > (2L \cos\theta/c)$ 。

根据声纳方程,用全回波信号和只用回波的稳态部分进行计算,得到目标强度的结果如下图所示。显然,取稳态部分的结果是准确的,用全脉冲计算不能得到满意的结果。



●:准确结果; *:全脉冲结果; ○:稳态部分结果
图 6 短柱 TS 值与脉冲宽度的变化(45°入射)

4.3 弹性球的散射

一般的声纳目标都是弹性体,图 7 是水中半径为 1m 的弹性铝球的回波波形,入射波频率为 1.5kHz($ka = 12.5$),稳态情况下目标强度 $TS_0 = -2.863$ dB。

从图中可以看出,弹性球的回波比较复杂,它包含表面镜反射回波、弹性波和绕射波等,属于多“亮点”情况,但其散射机理与刚性短柱不同。当入射脉冲宽大于最后一个回波产生的时刻,稳态便建立起来。

用回波的稳态部分和全回波计算的目标强度如图 8 所示,与短柱的结果相同。

4.4 谐振散射区的目标散射

在低频和谐振散射区,散射机理与高频不同。以刚性球的散射为例,假定入射波频率是 250Hz($ka = 2.09$,波长 6m)的正弦填充脉冲,不同入射脉冲宽度的回波结构见图 9。

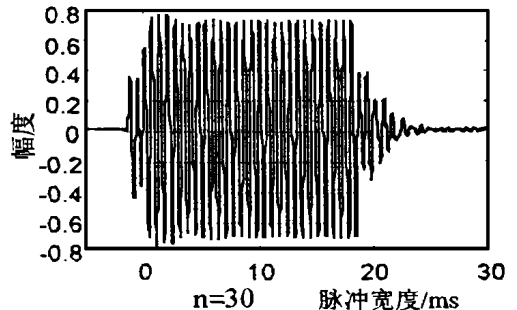
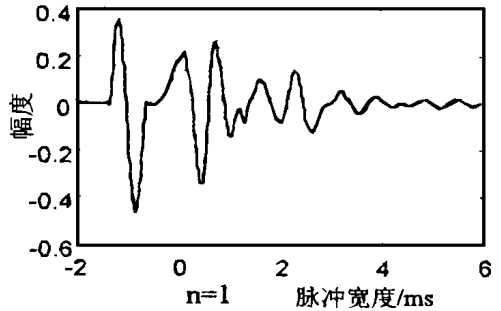
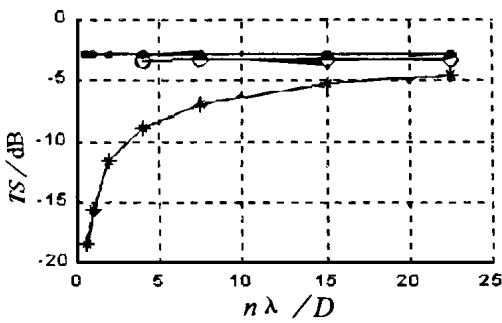


图 7 弹性球的脉冲回波



●: 准确结果, *: 全脉冲结果, ○: 稳态部分结果
图 8 弹性球散射目标强度随入射脉冲宽度的变化

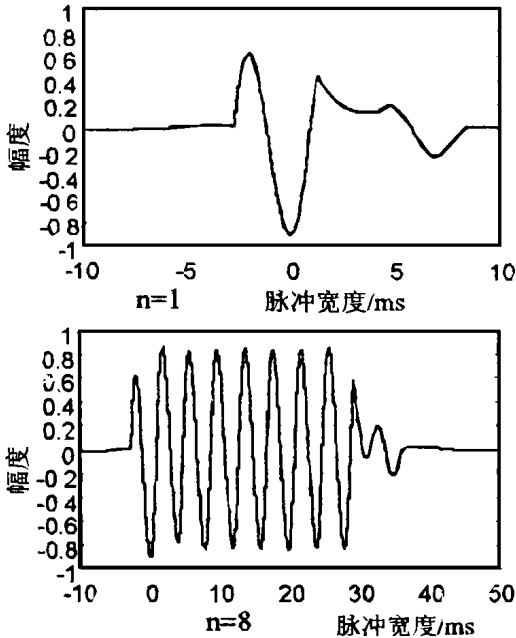


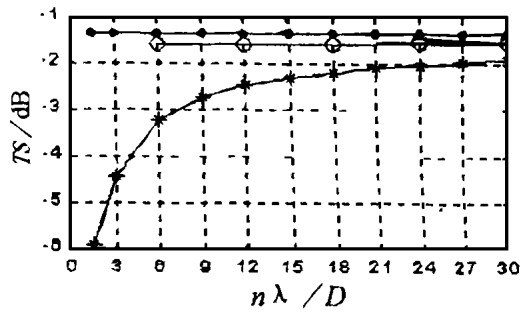
图 9 球的散射回波(250Hz, $ka = 2.09$)

n 等于 1, 脉冲宽度为 6m, 尽管脉冲全覆盖目标, 但仍然没有形成稳态散射。谐振散射回波波形带有明显的散射面的曲率效应和较大的衍射波^[3], 用回波的稳态部分和全回波计算的目标强度如图 10 所示, 与短柱的结果相同, 见图 6。

结果表明, 目标的谐振散射, “亮点”模型仍然是有效的, 只是产生“亮点”的机理与高频不同, 高频反射的“亮点”主要由表面镜反射波和棱角波组成, 而谐振散射“亮点”主要由表面散射波和衍射波组成; 因此, 稳态的建立条件应满足: $\tau_0 > \tau_d$, τ_d 是衍射波产生的时刻, 在所有“亮点”的效应都叠加在一起时, 才能建立稳态散射。

5 平面波条件

严格的平面波实验条件是很困难的, 实验通常声学技术



●: 准确结果, $TS_0 = -1.3340$ dB
*: 全脉冲结果 ○: 稳态部分结果
图 10 球谐振散射目标强度随入射脉冲宽度的变化

在球面波远场进行。以半径等于 a 的活塞发射器为例, 图 11 表示声轴上的辐射声随距离 r/r_g 的变化($r_g = a^2/\lambda$)^[4]。当 $r/r_g > 1$, 满足辐射远场条件时, 声波按球面波扩展。但能否近似平面波入射, 与声源和目标之间的距离 r 及目标的特征线度 L 有关。假定要求入射波强度在目标上允许有 1dB 的变化, r 应当同时满足 $r > r_g$ 和 $r > 9L$, 显然, L 越大, 入射波在目标上变化越小, 要求目标与声源的距离越远。

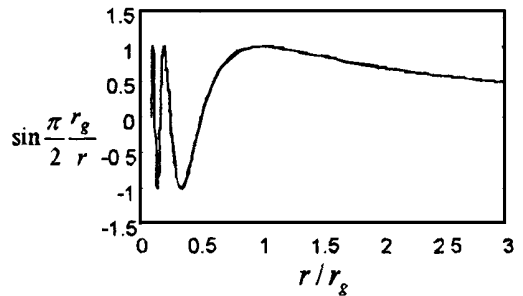


图 11 活塞辐射声场随距离的变化

6 结论

据声纳方程实验测量目标的目标强度, 需要满足平面波入射、稳态散射和远场测量 3 个条件。目标在球面波中满足平面波近似与声源和目标之间的距离、波长及目标的特征线度有关; 与单“亮点”回波不同, 对多“亮点”回波, 稳态散射条件的建立要求发射脉冲宽度大于窄脉冲回波扩展宽度; 而远场条件与目标的线度和波长有关, 在基本远场条件下, 测量结果有一定误差, 误差大小与目标特征和频率有关。

参考文献:

- [1] R. J. 乌立克, 洪申泽. 工程水声原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1972.

- [2] R. J. Bobber. Underwater Electroacoustic Measurements, Naval Research Laboratory, 1970.
- [3] 徐海亭, 韦正友, 刘彩芬. 脉冲镜反射回波及其表面曲率效应[J]. 声学学报, 1997, 22(2):

154-157.

- [4] E. Skudrzyk, The Foundations of Acoustics[M]. New York: Springer-Verlag/Wien, 1971.

研究和技术简报

氟离子对声致发光的猝息效应

刘岩, 师存杰

(青海大学化工研究所, 西宁 810016)

摘要: 本研究首次观察到在水溶液中溶解有 Cl^- 、 NO_3^- 、 F^- 、 HCO_3^{2-} 和 SO_4^{2-} 五种阴离子, 只有 F^- 在浓度高于 4.0mg/L 时会对声致发光产生猝息效应。当在 4.0mg/L-20mg/L 范围内改变 F^- 的浓度时, 声致发光强度随 F^- 浓度的增加而下降, F^- 的引入可能对空化区域的低温等离子体的形成造成障碍。

关键词: 声致发光; 氟离子; 猝息效应

中图分类号: 04263 文献标识码: A

声致发光是一种微弱的发光现象, 当溶液被超声波辐照产生空化效应时会伴随这一发光现象^[1]。1934 年被 Frenzel 和 Schultes 在水溶液中观察到^[2], 1937 年 Chambers 又在液态有机物中观察到^[3]。水溶液中声致发光的一些研究进展在 80 年代初被 Wolton 和 Reynolds 评述过^[4]。近年, Suslick 等对非水溶液中的声致发光光谱进行了研究^[5-6], Barber 等人最近对声致发光的光发射机制进行了分析^[7-8]。本研究发现在水溶液中溶解有 Cl^- 、 NO_3^- 、 F^- 、 HCO_3^{2-} 和 SO_4^{2-} 五种阴离子, 只有 F^- 的浓度在 4.0mg/L-20mg/L 之间会对声致发光强度产生抑制作用(见图 1)。

实验装置见文献[9-10]。声源频率为 1.1MHz, 声强 $I \approx 5.0 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$, 溶液温度控制在 $294\text{K} \pm 0.1\text{K}$ 之间。 Cl^- 的浓度在 5mg/L-25mg/L, NO_3^- : 0.2mg/L-20mg/L, F^- : 4.0mg/L-20mg/L, HCO_3^{2-} : 8mg/L-30mg/L, SO_4^{2-} : 0.4mg/L-40mg/L。当在上述浓度区间改变 Cl^- 、 NO_3^- 、 HCO_3^{2-} 和 SO_4^{2-} 四种阴离子的浓度时, 它们对声致发光强度没有影响。但是, 在 4.0mg/L-20mg/L 的浓度范围内改变 F^- 的浓度, 随着 F^- 浓度的增加, 声致发光强度迅速下降。Sehgal 等对水溶液中声致发光的研究证明, 空化效应产生的高温 ($\geq 5000\text{K}$) 使空化泡内含物被加热呈低温等离子体状态^[11]。但是, 本研究发现当 F^- 存在于水溶

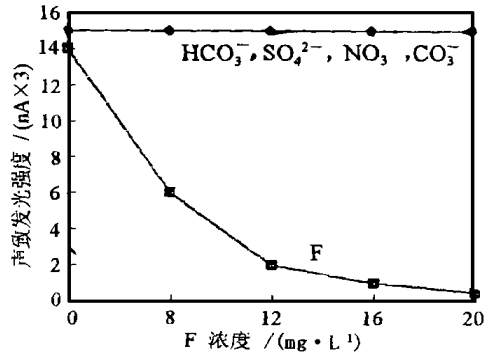


图 1 声致发光强度和 F^- 浓度之间的关系曲线。液中, 可能会对低温等离子体的形成造成阻碍作用, 其机理有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Verrall R. E., Sehgal C. M. [J]. Ultrasonics, 1987, 25: 29-30.
- [2] Frenzel H., Schultes H. [J]. Z. Phys. Chem, 1934, 27: 421.
- [3] Chambers L. A. [J]. J. Phys. Chem, 1937, 5: 290.
- [4] Wolton A. J., Reynolds G. T. [J]. Adv. Phys, 1984, 33: 595.
- [5] Suslick K. S., Flint E. B. [J]. Nature, 1987, 330: 553
- [6] Flint E. B., Suslick K. S. [J]. J. Am. Chem. Soc, 1989, 111: 6987.
- [7] Barber B. P., Puttermann S. [J]. Nature, 1991, 352: 318.
- [8] Barber B. P. et al. [J]. Phys. Rev. Lett, 1994, 72: 1380.
- [9] Liu Y. (刘岩). et al. [J]. Water Res, 1995, 29: 2014.
- [10] 刘岩. [J]. 应用声学, 1995, 14: 37.
- [11] Sehgal C. et al. [J]. J. Phys. Chem, 1980, 84: 396.

收稿日期: 99-11-12; 修订日期: 2000-04-03

南京大学近代声学国家重点实验室资助。

作者简介: 刘岩(1969), 男, 讲师。