

浊度计在现代海底热液活动调查中的应用

Application of nephelometer to investigating modern seafloor hydrothermal activities

刘长华¹, 汪小妹^{1,2}, 殷学博¹

(1. 中国科学院 海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

中图分类号: P715.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2008)01-0070-04

无论是深入认识海底热液活动的规律, 还是了解海底热液硫化物资源的分布情况, 首先需要做的是发现海底热液活动及其产物。因此, 用于发现和调查海底热液活动及其产物的技术手段非常重要。目前, 进行海底热液活动调查的技术手段有电视抓斗、ROV、AUV 和载人深潜器等。但由于使用这类技术设备需要相对高的投入和较复杂的附加装置, 而且从电视抓斗、ROV、AUV 和载人深潜器本身来讲, 它们也有一定的技术限制, 调查活动范围有限, 不能胜任大面积海底热液活动异常调查工作。因此, 载有各种物理、化学传感器和分析仪器的拖曳式走航连续观测系统仍是海底热液活动调查技术方面的一个重要发展方向。例如, 美国、英国等先后投资研制了多种拖曳式设备, 可进行海底地貌成像、电磁场、CTD、以及化学和物理多参数的测量, 为发现和确定海底热液喷口位置起到了巨大的作用。

浊度计是拖曳式走航连续观测系统中的多种传感器之一, 其获取的数据对调查发现海底热液活动比较重要。这是由于发现海底热液活动的关键是寻找到海底热液活动的异常表现。海底热液活动的直接表象之一是热液柱 (hydrothermal plume), 其物理、化学特征与普通海水有一定程度的不同, 在温度、浊度、背散射强度和化学组成等方面可以表现出一定的异常, 国外常用 CTD 捆绑光学浊度计 (CTDT), 或 CTD 捆绑多种光学传感器 (例如, 光学投影仪、光学浊度计、光学散射传感器) (CTDO) 来寻找发现这种异常。作者将介绍浊度计的基本原理及其在海底热液活动调查中的应用情况, 分析其存在的技术缺陷, 并从浊度计服务于海底热液活动调查出发, 初步探讨该技术未来的发展趋势。

1 一般浊度计的基本原理及存在的技术缺陷

浊度计所应用的原理是基于光学的知识, 即光线在真空中传播不会有能量的衰减, 能量的减少仅

仅是因为物质对光波的分散作用造成的, 光波碰到物质后会被吸收掉一部分, 还会有一部分发生散射现象, 这样原始的光强就会减弱, 见图 1。

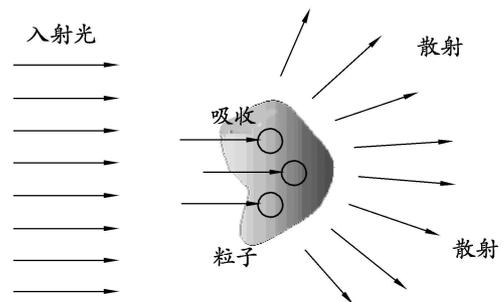


图 1 浊度计基本原理示意

公式表示为 $C = A + B$ 式中, C 为衰减量; A 为吸收量; B 为散射量。

现在设计的浊度计基本是利用一个发射光源, 使光线穿过被测物质 (如水体、空气等), 用一个接收装置如检波器, 接收发射光源发射的光波, 因为光波在传播过程中, 经过的物质必然会使光波的能量降低, 所以检波器接收到的光波强度就会比发射出的光波强度低, 两者之差就是由于物质的散射和吸收造成的, 把这种差值用电压的形式表现出来, 就是浊度值。

一般的浊度计是把技术重点放在发射光源和接收光源上, 开始的时候一般都用白炽光, 因为白炽光源廉价, 但是白炽光源受干扰大, 接收到的光波不只是发射光源发射出的, 造成的误差较大。现在采用较多的是以发光二极管为光源, 且通过干涉滤光器

收稿日期: 2007-08-10; 修回日期: 2007-10-31

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX3-SW-223); 国家自然科学基金资助项目 (40376020); 国家“863”计划青年基金项目 (2001AA616070)

作者简介: 刘长华 (1977), 男, 山东临邑人, 博士, 主要从事海洋地球化学研究, 电话: E-mail: lczhh@yahoo.com.cn

和激光束分裂器等设备把光线过滤成单一波长的光波, 如有 470, 540 和 660 nm 波长的光波。一定波长的光波在校准样中通过一定距离的传播后其衰减量是可以计算出来的, 即在已知的物质中通过一定距离后所检测到的光的强度与发射光源发射出的光强之比, 称之为传播率, 用 r_T 表示。悬浮颗粒、浮游生物、细菌、溶解的有机物质都是影响 r_T 的重要因素, 把水或空气固有的光学性质考虑在内, 控制发射光的特性, 浊度计就能测出水中或空气中的颗粒物的浓度和清洁度。

光波的衰减系数也是可以表示这个光强差的。假设给定光波的波长, 则传播率与光波的衰减系数有如下关系:

$$r_T = e^{-Cx}$$

式中, C 是光的衰减系数, x 是发射光走过的距离(一般是 10 或 25 cm)。

在浊度计的应用中, 一般把光强转化为电压计算, 所以接收光强转化成输出电压 (V_{sig}), 当把发射光穿过的物质设为不透光物质, 则此时吸收的光强最弱, 相应的输出电压最小 (V_{dark}), 输入电压 (V_{ref}) 是已知的, 所以传播率可用下面公式算出:

$$r_T = \frac{V_{sig} - V_{dark}}{V_{ref} - V_{dark}}$$

从而可以得出:

$$C = -\frac{1}{x} \ln r_T = -\frac{1}{x} \ln \left(\frac{V_{sig} - V_{dark}}{V_{ref} - V_{dark}} \right)$$

在浊度计的研制方面 WETLAB 公司做的比较好, 该公司研制的 Cstar 浊度计是当今较先进的浊度计之一, 其示意图见图 2。

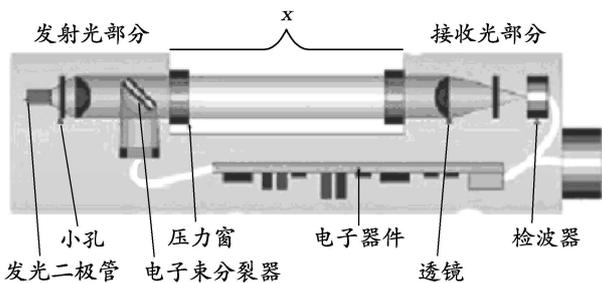


图 2 Cstar 浊度计设计示意

图 2 代表了绝大多数浊度计的设计原理: 发光二极管发射一定波长的光, 通过小孔和透镜的聚焦使光路呈直线传播, 干涉滤光器和电子束分裂器等设备作为光源的校准用, 主要考虑浊度计工作很长时间后温度的升高会对光电转化产生影响, 导致输出和输入的电压不能准确地表示光强的大小和变化。光波穿过第一个压力窗进入被测物质, 然后再通过第二个压力窗进入接收光室, 经过透镜和小孔

把光线聚焦, 聚焦后的光波被检波器接收到, 最后光波打到硅光电二极管上, 把光强转化为电压。用电压表就可以测出相应的参数, 其所表示的就是经过被测物质吸收和散射后的光波强度, 当然这其中会包括光波在一般物质(或被测物质, 例如水和空气)中传播的能量损耗, 只要事先把实验数据得出最后去除就可以了, 也可以在测量同一介质时所有的数据都包含这一损耗量。这样就得到了要测量物质的浊度值。如前面所述, 浊度值是用电压来表示的。

在一般的应用中, 这种设计的浊度计是完全符合要求的, 因为它所检测的物质中粒子浓度较大, 浊度计的灵敏度是相对较高的, 颗粒物本身的不规则性和不均一性对精度的要求也不会起到超出误差范围的程度, 而在海底热液活动的调查中, 热液流体的颗粒物浓度是随离喷口流体的远近而变化的, 离喷口越近的地方, 颗粒物浓度越大, 越远的地方, 颗粒物浓度越小。在实际的调查中, 将调查设备直接放到热液喷口附近是调查中很难做到, 通常的情况是“没有目的”的搜寻, 离热液喷口或远或近, 近的地方现有的浊度计是可以检测到异常存在的, 如果检测的地方是远离喷口的地方, 颗粒物浓度低, 则现有的浊度计就不能满足要求, 测不出或测不准异常的存在, 并且误差就会影响到精度的问题, 此时就必须考虑换一种设计方案来检测出异常的存在。颗粒物的形态和是否大小均一等问题在浊度计的初始研究中就得到了充分的认识, 也做了详细的研究, 虽然仍有待于在浊度计应用方面得到更深层次的提高, 但基础理论的研究相对滞后, 影响了在颗粒物形态和大小均一性角度的应用探讨。

2 浊度计在海底热液活动调查中的应用

浊度计对现代海底热液活动区的发现做出了重要的贡献。早在 1984 年, 作为 1984~1985 年 NOAA 有关大西洋洋中脊喷口项目的一部分, Nelsen 等^[1]在 TAG 区使用浊度计通过 9 个站位的工作, 实时观测了该区的热液柱, 后来在 1985 年又使用浊度计调查了 TAG 区的水体, 测定了水体中的溶解 Mn 和颗粒 Fe, 进一步证实了 1984 年观测的结果。并指出, 水体的浊度和溶解 Mn 异常有助于导致高温黑烟囱的发现, 浊度计的光学响应主要起因于热液来源的颗粒物, 不仅浊度值和总悬浮物 ($r = 0.98, n = 34$)、颗粒 Fe ($r = 0.88, n = 32$) 之间存在强烈的相关关系, 而且浊度值与溶解 Mn (有一个较大的浓度范围, 0.2~31.0 nmol/kg) 之间也存在着很好的关联 ($r = 0.88, n = 78$)。这些数据很好地证明了现场浊度测定对起源于热液喷口的热液柱的定位和调查很有用。



Nelsen 等^[2]于 1991 年又报道了 1985 年使用浊度计和 CTD 相结合(NCTD)的技术,对水体进行调查后,在大西洋洋脊 26°N 的 TAG 热液区发现了第一个黑烟囱,并通过随后执行的区域性水柱填图(有助于确定热液柱中悬浮颗粒物的范围、质量和相互作用情况),完成了 29 个 NCTD 站(坐站/走航)的工作,覆盖了 25~30 km² 的洋脊段。同时,基于悬浮物浓度梯度和覆盖源区的热液柱圆顶,明确了形成了热液柱的源区,并第一次通过海上观测,证实了在实验室里得到的有关热液柱的实验结果,而且表明热液柱的圆顶能够作为一个源区定位的标志。进一步对比热液柱的悬浮物与温度、盐度分布状况,表明了悬浮物、温度和盐度三者之间所存在的紧密联系,也说明了热液柱对区域温度和盐度有一定的影响。1993 年, Rudnicki 等^[3]在大西洋洋脊 26°N, 使用 CTD 和浊度计在 TAG 热液区中热液丘状体南部大约 100 m 的位置(非浮力热液柱位于此处)进行了连续 9 h 的升降作业,通过这种作业方式,获得了靠近喷口区非浮力热液柱变化的记录,发现非浮力热液柱的颗粒最大值出现在大约水深 3 170~3 320 m 之间的水体中。同年,通过透射计和浊度计相结合的方法,首次确定了大西洋洋脊 Broken Spur 热液区的位置,目前在 Broken Spur, CTD-浊度剖面达到了 300 个^[4],对该区热液柱的空间结构有了较深入的认识。

使用浊度计不仅在大西洋洋脊的热液区发现了许多海底热液活动的特征,在太平洋和印度洋同样通过浊度计对海底热液活动有了一些新的了解。在 1996 年 2 月 28 日, NOAA/PMEL 开发的 T 相监测系统,在东北太平洋监测到强烈的地震。该地震发生在 Gord 洋脊最北段附近 42.68°N, 126.78°W。强烈的地震活动持续了 3 周,直到 1996 年 3 月 20 日。照相工作和 SeaBeam 研究显示,地震活动是由海底熔岩喷发引起的(其使海底增加了 0.02 km³ 的新鲜物质)^[5],并在一个轴向海岭的北部(42.61°N, 126.82°W),发现了一个小的 SeaBeam 异常中心,其与 3 月 10~20 日的地震爆发比较一致。在地震过程中, Gord 洋脊熔岩喷发与胡安德富卡洋脊 Coaxial 段上以前观测到的熔岩喷发情况有很多相同的特征^[6-8],这为研究在喷发期间和喷发后,大洋事件热

液柱中颗粒物的物理化学变化,提供了一个很好的机会。正是基于这种考虑, Feely 等为了了解 Gord 洋脊附近(42.68°N, 126.78°W) 1996 年 2 月末岩浆侵入后产生的影响情况,分别于当年 3 月、4 月和 6 月在该地区执行了 3 个航次。在这 3 个航次中,均收集了颗粒样品、CTD/浊度数据以及总溶解 Fe 和 Mn 样品,研究了 1996 年 Gord 洋脊事件和长期热液柱中热液颗粒的化学变化,发现这些事件热液柱长轴直径大约为 10~15 km,处于 1 800~2 700 m 的深度范围中,热液柱的厚度大约为 700 m,边界范围大约在水深 1 800~2 500 m 处。在水深 1 800~3 100 m 的范围内,悬浮物明显增加。浊度值与颗粒 Fe 之间存在强烈的线性关系,并估算出事件热液柱中颗粒 Fe 的总量大约为 20×10⁶ moles 的 Fe^[9]。所有这些成果的获得,浊度计做出了很大的贡献。

在印度洋, Johnson 等^[10]报道了 1996 年在东南印度洋洋脊轴部调查期间,靠近 Amsterdam St. Paul 海原的扩张中心,发现了一个高达 1 100 m 正在活动的海底火山 Boomerang 海岭。该海岭顶部位于海平面以下 650 m,有一个 200 m 深、2 km 宽的圆形火山口。在该火山口处,水柱剖面显示出 1.7°C 的温度异常和 0.3 V 的浊度异常,该异常比其他热液柱大将近一个数量级,在其他深海热液区,这种大的光学背散射异常仅在富挥发分流体的热液区或者一个热液体系在初次或再次喷发不久,才有可能出现。目前还没有找到导致背散射增强的具体来源。该区水体中浊度和温度表现出的异常表明该火山口中存在热液活动。特别是,浊度剖面表明,从火山口底部到其顶部边缘,水体明显分为几层,可能反映出伴随不同热液通量的不同热液活动的结果。

此外, Klinkhammer 等^[11]报道了 1999 年在南极洲 Bransfield 海峡发现了新热液喷口区。该区的热液柱比较复杂,浊度数据表明热液柱有时具两个最大浊度值中心,一个面积较大分布在水深 1 500 m 处,一个面积较小处在水深 600~800 m 处,并且通过使用 ZAPS 设备上的浊度计示踪了浅部热液柱的源地是靠近洋脊顶的一凹陷处。

3 浊度计的发展趋势

由于浊度和温度是热液柱与周围正常海水相

比,可以产生明显异常的两个物理指标,而且与热液柱的温度状态相比,被海水强烈稀释的热液柱边缘(该处的温度异常几乎测不出来),依然可以具有较明显的浊度异常。因此,有效的提取浊度异常,并与温度指标相结合应是寻找海底热液活动的一个比较合适的方法。同时,也表明用于海底热液活动调查的浊度计,必须针对热液柱中颗粒物的特征来设计,才有可能很好的定量热液柱的浊度特征。这也是用于海底热液活动调查的浊度计未来技术发展的一个主要方向。另外,浊度计技术的发展,应用到海底热液活动调查的实际中,必须与温度传感器相结合,合成拖曳式设备的核心,才有可能真正大大提高海底热液活动调查工作的效率和发现海底热液活动的机率。

参考文献:

- [1] Nelsen T A, Klinkhammer G P, Trefry J H, *et al.* Real time observation of dispersed hydrothermal plumes using nephelometry: examples from the Mid Atlantic Ridge [J]. **Earth and Planetary Science Letters**, 1987, **81** (2-3): 245-252.
- [2] Nelsen T A, Forde E B. The structure, mass and interactions of the hydrothermal plumes at 26° N on the Mid Atlantic Ridge [J]. **Earth and Planetary Science Letters**, 1991, **106**(1-4): 1-16.
- [3] Rudnicki M D, James R H, Elderfield H. Near field variability of the TAG non buoyant plume, 26° N, Mid Atlantic Ridge [J]. **Earth and Planetary Science Letters**, 1994, **127**(1-4): 1-10.
- [4] German C R, Rudnicki M D, Klinkhammer G P. A segment scale survey of the Broken Spur hydrothermal plume [J]. **Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers**, 1999, **46**(4): 701-714.
- [5] Chadwick W W, Embley R W, Shank T. The 1996 Gorda Ridge eruption: Geologic mapping, sidescan sonar, and Sea Beam comparison results [J]. **Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography**, 1998, **45**: 2547-2569.
- [6] Baker E T, Feely R A, Mottl M J, *et al.* Hydrothermal plumes along the East Pacific Rise, 8° 40' to 11° 50' N: plume distribution and relationship to the apparent magmatic budget [J]. **Earth and Planetary Science Letters**, 1994, **12**: 1-17.
- [7] Massoth G J, Baker E T, Feely R A, *et al.* Observations of manganese and iron at the CoAxial seafloor eruption site, Juan de Fuca Ridge [J]. **Geophysical Research Letters**, 1995, **22**(2): 151-154.
- [8] Embley R W, Chadwick Jr W W, Jonasson I A, *et al.* Initial results of the rapid response to the 1993 CoAxial event: relationships between hydrothermal and volcanic processes [J]. **Geophysical Research Letters**, 1995, **22**(2): 143-146.
- [9] Feely R A, Baker E T, Lebon G T, *et al.* Chemical variations of hydrothermal particles in the 1996 Gorda Ridge Event and chronic plumes [J]. **Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography**, 1998, **45**(12): 2637-2664.
- [10] Johnson K T M, Graham D W, Rubin K H, *et al.* Boomerang Seamount: the active expression of the Amsterdam St. Paul hotspot, Southeast Indian Ridge [J]. **Earth and Planetary Science Letters**, 2000, **183**(1-2): 245-259.
- [11] Klinkhammer G P, Chin C S, Keller R A, *et al.* Discovery of new hydrothermal vent sites in Bransfield Strait, Antarctica [J]. **Earth and Planetary Science Letters**, 2001, **193**: 395-407.

(本文编辑: 刘珊珊)