

# 水面下的波浪——海洋内波<sup>1)</sup>

李家春

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)



李家春, 中国科学院力学研究所研究员、博士生导师, 中国科学院院士。1962 年毕业于复旦大学, 1966 年中科院力学研究所研究生毕业。现任中国力学学会副理事长, 《力学与实践》主编, 《力学学报》副主编, 《应用数学与力学》, 《水动力学研究与进展》, 《力学进展》常务编委, International Journal of Sediment Research, Chinese Phys. Lett., 《中国科学》, 《海洋工程》等刊物编委。长期从事流体力学研究, 在流动的非线性问题和力学中数学方法领域做出了理论成果。研究自然环境中的波、流、涡和湍流, 解决与流动有关的环境力学问题。

**摘要** 讨论了海洋中因温度、盐度非均匀引起的分层结构。内波因恢复力小比表面波有较大振幅和较低频率。在地球上, 内波以不同形式(如: 内潮, 内孤立波等)发生在层结、洋流和地形合适的大陆边缘地带。内波活动是海洋结构的安全隐患、水下声道的背景噪声源和深水混合的“搅拌器”, 我们考察了内波在海洋工程、海洋环境和水声探测中的各种应用。

**关键词** 海洋内波, 内潮, 层结, Morison 公式, 水声学, 海洋环流

21 世纪是海洋的时代。

海洋占地球表面积的 71%。海洋中蕴藏着丰富的矿物、油气、能量、水产和空间资源。人口的增长, 经济的发展, 资源的需求, 人类的生存空间将从陆地向海洋延伸。世界各国都关注海洋的开发, 已经开始开采水深达 2000~3000 m 的油气资源, 人工岛, 海底空间站等海洋空间利用计划也已提到议事日程。中国石油年产量维持在 1.6 亿吨左右, 陆上石油进入开采后期, 发展潜力严重不足, 但对石油需求日益增长: 1993 年起就成为石油净进口国; 2004 年, 中国进口石油 9000 万吨; 到 2020 年, 每年约需进口 2 亿吨石油。为了弥补石油资源的缺口, 国家十分重视海上石油的开发, 并把目标瞄准我国南海的海洋石油资源, 这是一项关系我国能源安全的重大决策。

由于海洋远离大陆, 严峻的风、浪、流、潮环境, 使海洋观测比气象观测困难得多, 资料极为稀少。近 30 年来, 理论研究和数值模拟取得进展, 尤其是高新技术的仪器和空间对地观测手段的发展, 各国开展了大规模的联合科学研究计划, 使海洋科学有

了长足的进步。但是, 仍然有许多未知的领域需要进一步探索, 同海洋工程, 海洋环境, 水声学紧密相关的海洋内波就是其中之一。

## 1 水下的轩然大波

由于海洋内波发生在水体内部, 在水面上往往不易觉察到内波的存在和活动, 使海洋内波的观测和研究蒙上一层神秘的面纱。

1893~1896 年, 挪威“弗雷姆”号考察船在北极探险过程中, F. 南森发觉船只驶入上层有冰融化淡水区域时突然减速。经研究知道, “Dead water”现象是由于船舶航行在密度跃层上, 为产生海洋内波做功需要耗费能量, 所以船舶难于前进, 这是海洋内波的早期发现<sup>[1]</sup>。

19 世纪 70 年代, 经过在安得曼海上 4 个月的观测和随后 EXXON 公司的钻井作业, 发现该海域可以有高达 1.8 m/s 的流速。后来的卫星图片显示, 那里曾有孤立子内波通过(图 1)。Amoco 公司也注意到在南中国海的内潮和内孤立波现象。所以, 人们决不可以轻视这些隐藏在水下的轩然大波<sup>[2,3]</sup>。

本文于 2004-03-03 收到。

1) 中国海洋石油总公司合作项目和中国科学院知识创新工程资助。

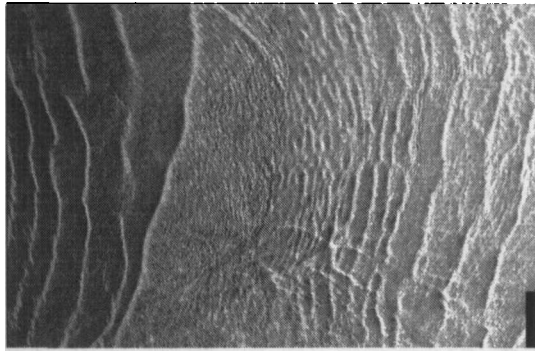


图1 安达曼海内孤立子的卫星图像

为什么同样的外界因素,在海洋表面只能引起微小的扰动,而在海洋内部却能掀起轩然大波呢?究其原因,原来在分层海洋中,由于密度差远小于大气和海水的密度差,因此,相当于将分层介质置于微重力场中,其约化重力加速度为

$$g' = \frac{\Delta\rho}{\rho}g$$

因此,恢复力也减小,仅为表面波的1%量级,从而使波幅增大.从能量的观点来看,波幅与重力的平方根成反比,因此,在能量相同的条件下,内波波幅可以是表面波的20~30倍.内波波幅达数十米,乃至百米并不罕见,所以,内波是水下的巨浪.由于同样的原因,内波的频率低,介于惯性波频率

$$f = \Omega \sin \phi$$

和 Brunt-Vasala 频率

$$N^2 = -\frac{g}{\rho} \frac{d\rho}{dz}$$

之间,其中  $\Omega$  是地球旋转角速度,  $\phi$  是当地纬度.周期为 10 min 到 24 h. 根据观察,海洋内波长度尺度范围很宽.对海洋结构有影响的内波,波长可以是几百米至百公里,温跃层处,内波振幅可以在百米量级,所诱导的内波流场的最大流速可以达到 2 m/s 或以上.在连续分层的流体介质内,内波是一种体波,波的群速度与波阵面法向垂直,表明能量沿波阵面传播;流体质点运动速度也是如此,所以内波是一种横波 [4].

## 2 海洋的密度分层结构

海洋内波是指在稳定层结的海洋中发生的、最大振幅出现在海洋内部的波动,了解海洋密度分层的结构是内波研究的前提.

实际上,大洋沿垂直方向大致可以分三层:海洋表层由于风剪切和表面波破碎造成上层混合层

(UML),在那里由于湍流混合,温度几乎是均匀的,厚度约数十米;在海底为厚 10 m 左右由剪切产生的湍流边界层(BBL);在上述两层中,平均速度满足对数分布规律.海洋的中间层是相对平静的大洋内部,在那里由内波产生间隙性的微弱扰动,并呈现片状的微结构 [5,6].在混合层底部可以由于外部的强迫:风应力、加热和冷却发生卷挟现象.室内实验研究发现,混合层的无量纲卷挟速度是总体 Richardson 数的负次幂函数.研究这种卷挟可以预测混合层或温跃层的演化,所以也称为温跃层动力学 [7].

海洋中普遍存在的层结现象可以由海水的温度和盐度差异引起,所以,在海洋的一定深度上存在着温跃层(thermocline)和盐跃层(halocline),并导致密跃层(pycnocline)的出现.主跃层出现在深度约 300~1000 m 处.沿纬向,在赤道附近主温跃层强而较浅,在中纬度地区,主温跃层变弱变深,高纬度处又出现在浅层.季节性跃层一般在 50~100 m 左右,一般发生在春夏(图 2).此外,还有周日温跃层存在,因此,在全球范围的海域内广泛存在着内波.这种分层结构可以用 Holmboe 密度模式近似,在密度梯度较大处往往用界面波代替 [1].实际上,水表面波是大气海洋系统内的界面波.

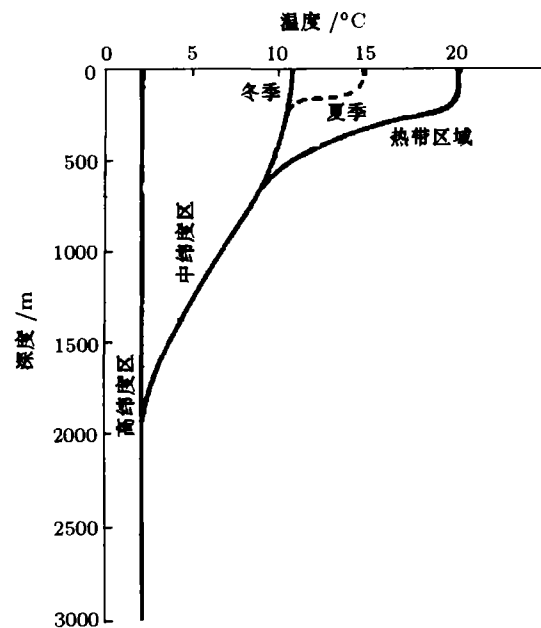


图2 海洋中的沿深度方向的温度分布

## 3 内波的时空分布

海洋内波主要可以通过链式传感器和综合孔径雷达(SAR)进行探测.前者通过沿深度分布的传感器来测量电导率、温度和盐度,这就是电导率温

深仪 (CTD) 和盐度温深仪 (STD). 通过上述仪器可以测量等温面变化的数据, 从而获取内波的信息 (图 3)<sup>[8]</sup>; 后者利用在内波波峰后和波谷后处分别产生幅聚和幅散现象, 从而使水表面改变粗糙度, 形成条纹结构, 并由此发现内波的踪迹. 虽然也可以用可见光和其它雷达进行探测, 但 SAR 灵敏度高, 不受云层影响, 因此是主要的手段.

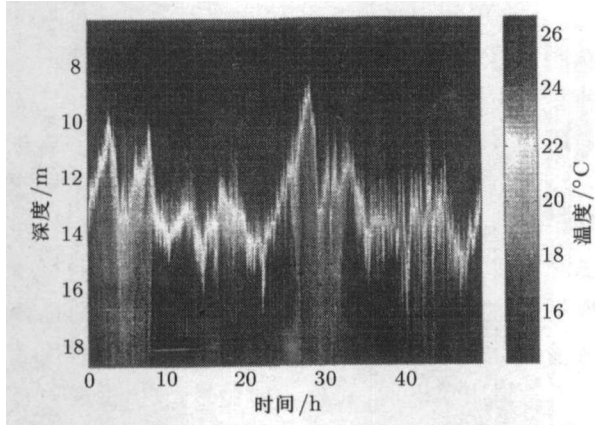


图 3 1992 年 8 月 23~25 日在黄海由 32 通道链式传感器测得的温度场

30 年来, 通过各国在 ERST/LAND STAT-1 空间站上的遥感和现场观测, 可以绘制出全球的内波分布图. 人们会发现大部分内波经常出现在层结、地形和洋流条件适合的大洋边缘区域, 时间多数在夏季有强跃层出现的时候 (图 4).

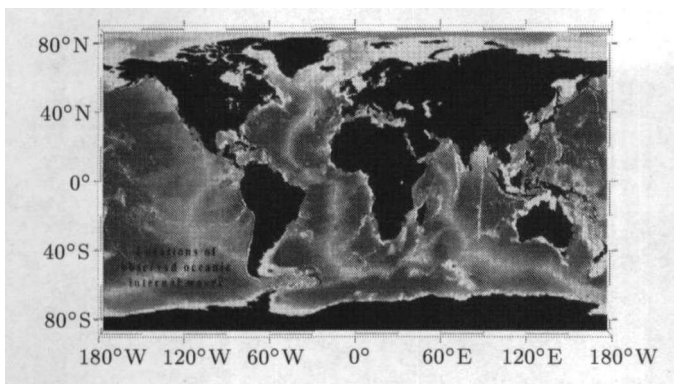


图 4 全球内波分布

内波发生的海域可以扩展到北极白令海峡、南极 Weddel 海附近. 也有一些例外, 比如: 可以在大西洋中部海洋中脊 Azores 北观察到孤立波; 也可以用声多普勒流速仪 (ADCP) 在南太平洋 Bismark-Solomon 群岛东北观察到孤立子波包. 前者是由于墨西哥湾流通过海底山脊, 后者是在 Bismark-Solomon 群岛的岛屿间有海槛所致<sup>[9]</sup>. 我国南海北部地区, 因为春、夏会有季节性温跃层出现, 加上那里的地形

由东南向西北逐渐变浅, 东部菲律宾地区有狭窄水道, 由正压潮同地形相互作用产生或发生分裂<sup>[10]</sup>, 是内潮的多发地区<sup>[11~16]</sup>.

#### 4 形形色色的内波

内波的形式多样, 包括: 内潮、内孤立波、周期内波, 小尺度内波. 实际上, 在湖泊和峡湾有层结的水体中, 也可以有内波. 类似于水面波, 在问题中存在 4 个长度尺度, 波幅  $A$ 、波长  $L$ , 水深  $H$  和密度显著变化的长度尺度, 对于界面波有两个深度参数. 综合起来, 我们可以构成类似于  $Ur = AL^2/H^3$  数的特征参数, 表征非线性和频散效应的大小, 从而划分各种波浪理论的适用范围.

周期波, 可以有小振幅的线性波, 对于波幅略高者, 可进行弱非线性修正; 内孤立波表征了非线性同频散效应的平衡, 一般用 KdV 方程描述, 可以有孤立波解和椭圆余弦解. 在上下层深度接近于 1 的临界情况, 服从修正的 KdV 方程. 在大洋中, 如果密度变化限于表层, 远小于波长, 而在深水区, 密度为常数, 可以用中长波方程 (ILW) 描述. 当深度趋于无穷时, 变成 Benjamin-Ono 方程; 弱二维的内孤立波服从 Kadomtsev-Patviashvili (KP) 方程. 浅水内波, 可以描述内潮在大陆架上的运动<sup>[10]</sup>. 可以用积分变换、强迫 KdV 方程、数值方法研究由外界扰动在分层介质中的瞬变波<sup>[1,10,17]</sup>.

#### 5 海洋结构物的安全隐患

曾有石油钻井机被扭转了  $90^\circ$ , 并推移了 30.48 m 和内波把潜艇托出水面或拖下水底的报道. 迄今, 我国已在南海北部地区建采油气平台 18 座, 包括: 南海西部的涠州、崖城、东方、文昌油田和南海东部的惠州、流花、陆丰、西江油田等 (图 5). 1992 年,



图 5 我国 1996 年投产的南海东部的海洋平台, 水深 310 m

中国南海东部石油公司在东沙群岛附近的石油钻井机在孤立子内波经过时无法操作, 锚定的油罐箱在不到 5 min 内摇摆了  $110^\circ$ <sup>[18]</sup>. 人们注意到在内波活动频繁的海区, 石油钻井平台设计必须考虑它能经受内波产生的作用力<sup>[2]</sup>.

中国科学院南海海洋研究所实验三号科学考察船于 1994, 1996, 1998 年在离珠江口 300 km 的东沙群岛西南 ( $20^\circ 40' N$ ,  $115^\circ 51' E$ )、西部 ( $22^\circ 22' N$ ,  $116^\circ 58' E$ ) 和南部地区 ( $20^\circ 21' N$ ,  $116^\circ 50' E$ ) 观测, 那里水深 300~500 m. 根据观察, 发现内波出现深度在 0~150 m, 多数在 40~60 m. 最大流速达 1.5~2.0 m/s, 波速 2.0 m/s. 出现时间一般在大潮后 4~5 天最频繁, 间隔 12 h. 内波诱导的突发性强流出现形式有: 单锋: 持续 15 min, 流速 1 m/s; 多锋: 每个持续 15~25 min, 间隔 1.5 h, 强度逐渐减弱, 方向向岸: NW-W.

以往的内波研究仅关注波浪的运动和变形, 忽视内波流场的分析, 只有少数工作涉及内波流场及其同结构物的相互作用<sup>[19]</sup>. 近年来, 我们通过和中国海洋石油总公司的合作项目, 对内波流场进行分析, 得出如下结论<sup>[20]</sup>: 在跃层上下, 存在着速度剪切, 跃层上下密度差愈大, 跃层愈薄, 剪切强度也愈大, 这一结论已为地中海西西里岛 Messena 海峡的观察证实; 存在临界深度, 当水深由小于该深度到大于该深度时, 内孤立波由下凹变成上凸<sup>[21]</sup>; 由于水深同波长比是小量, 内波诱导的流场的水平速度几乎均匀, 因此可以产生巨大的水平推力, 使海洋结构物发生整体推移或扭转; 同内波波长相比, 海洋结构物的尺度较小, 因此, 可以用 Morison 公式计算作用力. 因  $K_c = O(10^2)$ , 黏性力起主要作用. 周期波的剪切可以导致疲劳破坏. 孤立波波峰到达时, 对结构物呈冲击作用<sup>[22,23]</sup>. 针对内波力的特征, 可以增强温跃层附近结构; 减小盛行波方向的迎风面; 尽量注意盛行风向左右结构设计的对称性, 加强基础, 隔振防振等工程措施来保证生产的安全性.

## 6 水下声道的背景噪声源

同电磁波、可见光相比, 声波是在水中传播最远的波动源. 1912 年 Titanic 号客轮同冰山相撞, 为了寻找沉船, 美国科学家发明了利用回声探测水下目标的仪器, 1914 年测到 3 000 m 外的水下冰山. 随着压电换能器的发明, 结合电子管放大技术, 利用水声在水中远距离探测, 第一次收到了潜艇回波, 法国物理学家研制成了声纳, 开创了近代水声

学的研究, 被广泛应用于舰船、鱼群、水深、地貌、油矿的探测.

水声传播的速度依赖于水的压力和密度. 海洋的密度分层结构导致特定的海洋声速分层结构, 并形成水下声道, 水声可在其中折射和反射, 向一定方向远距离传播. 在表层, 声速具有正梯度, 该区域海水密度均匀, 但受风、表面波的随机影响, 称为混合层声道. 混合层到 1000 m 左右深度是有负声速梯度的主跃层声道. 1000 m 以下是较为平静的深海声道, 声速具有正梯度. 在水深 1000 m 处, 声速最小, 成为声道轴<sup>[24]</sup>.

为了正确识别目标, 一方面要了解目标声信号的特征, 包括: 目标反射信号(主动探测)和目标辐射(被动探测)信号. 目标反射信号是发射信号从目标镜面反射、散射、内反射和诱发共振构成, 它们可以使发射信号发生多普勒频移, 调制和延时, 目标强度和谱特性可以用于识别. 目标辐射信号, 如: 潜艇来自机械噪声、螺旋桨噪声等. 机械噪声是强线谱和弱连续谱的叠加; 螺旋桨噪声则是水流引起的叶片振动(千赫和低频线谱)和空化噪声(具有 100~1000 Hz 谱峰的连续谱)构成. 在进行声信号处理时, 必须把目标信号从背景噪声和混响效应中提取出来. 内波是海洋中的重要背景噪声源, 可以引起声信号起伏: 起伏同内波活动有强关联, 夏季可达 20 dB, 振幅和相位起伏谱非单调下降, 有相同的峰值位置等. 也可据此间接研究内波的特性. 20 世纪 70 年代发现了深水的 GM 谱, 具有普遍意义. 由于浅海的影响因素多, 特别是内潮、内孤立波同地形的相互作用, 所以, 浅海内波的研究是学术界、工程界关注的重点<sup>[8]</sup>.

## 7 深部海水混合的“搅拌器”

海洋环流是能量和物质运输的载体, 影响着全球气候和海洋生态环境. 一般认为, 风生环流造成洋流的水平运动, 热盐环流导致洋流在子午面内垂向运动. 也就是说, 像大气的 Hardy 环流一样, 水团冷却、蒸发变重后在两极下沉, 到赤道因降水、加热变轻后上升, 所以浮力是子午面环流的主要驱动力.

有人对这种解释提出了质疑. 因为海洋环流系统大都处于稳定层结状态(只有尺度为数公里、持续数小时的不稳定水团偶尔出现), 加热、冷却源构形也不同于 Rayleigh - Benard 对流和大气环流. 早在 1916 年, Sandstrom 就得出结论, 水平、垂直分离的冷、热源只能在热源低于冷源的情况下, 在冷热

源水平位置间的空间存在对流。实际上，在赤道太阳加热只能穿透数十米，极地冷却仅限于表层，所以浮力只能引起表层的混合。最近，黄瑞新、王伟的实验进一步证实了 Sandstrom 的原理。于是，必须要回答导致深海混合的能量来源问题。

研究表明，造成深水混合的能量仍来自于风和潮汐。前者通过风应力从大气输入 20TW 功率到海洋，其中 95% 产生表面波和混合层湍流，4% 产生海洋环流，1% 产生中尺度涡；后者输入 3.6TW 功率，其中 75% 在大陆架耗散，25% 转化成内潮。地热和大气压力在输入功率中占很小的份额。以往的观测只有 0.1TW 的功率转化成小尺度的内波。考虑到因中尺度涡失稳可以补充 0.6TW 的能量源，所以，小尺度内波可以分出 0.2TW 功率进行深水混合。由于有内波起着混合深水的“搅拌器”作用，合理解释了子午面上垂面对流的维持机制<sup>[6,25]</sup>。尽管这个模型还有许多方面有待研究，它从能量平衡角度根本改变了过去对海洋环流的认识，从而影响海洋物质、水体和热量的输送，乃至未来气候的预测。

### 参 考 文 献

- 1 富永政英. 海洋波动 - 基础理论和观测成果. 北京: 科学出版社, 1976. 423~456
- 2 Osborne AR, Burch TL, Scarlet RI. The influence of internal waves on deep-water drilling. *J Petro Tech*, 1978, 30: 1497~1504
- 3 Osborne AR, Burch TL. Internal solitons in the Andaman sea. *Science*, 1980, 208: 451~460
- 4 Tritton DJ. *Physical Fluid Mechanics*. Van Nostrand Reinhold Company, 1977
- 5 Li JC. Turbulence in Atmosphere and Ocean. In: *New Trends on Fluid Mechanics and Theoretical Physics*. Peking University Press, 1993. 427~433
- 6 Wuest A, Lorke A. Small scale hydrodynamics in lakes. *Ann Rev Fluid Mech*, 2003, 35: 373~412
- 7 Turner JS. Development of geophysical fluid dynamics: the influence of laborator experiments. *Appl Mech Rev*, 2000, 53(3): R11~R22
- 8 Wang T, Gao TF. Statistical properties of high frequency internal waves in Qingdao offshore area of the Yellow sea. *Chinese J Oceanology and Limnology*, 2002, 20(1): 16~21
- 9 Jackson CR, Apel JR. *An Atlas of Internal Waves and Their Properties*. Global Ocean Associates, 2002
- 10 Grimshaw R. Internal solitary waves. In: Liu Philip L-F, Eds. *Advances in Coastal and Ocean Engineering*. Vol.3 World Scientific, 1997. 1~30
- 11 Hsu MK, Liu AK. Evolution of nonlinear internal waves northeast of Taiwan. In: *Proc. Eighth Int Offshore and Polar Eng Conf*, Montreal, Canada, May 24-29, 1998. 18~24
- 12 Hsu MK, Liu AK, Liu C. A study of internal waves in the China Seas and Yellow Sea using SAR. *Cont Shelf Res*, 2000, 20: 389~410
- 13 Liu AK, Chang YS, Hsu MK, et al. Evolution of nonlinear internal waves in the East and South China Seas. *J Geophys Res*, 1998, 103(C4): 7995~8008
- 14 蔡树群, 甘子均, 龙小敏. 南海北部孤立子内波的一些特征和演变. *科学通报*, 2001, 46(15): 1245~1250 (Cai Shuqun, Gan Zijun, Long Xiaomin. Some Characteristics and evolution of the internal solution in the northern South China sea. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(15): 1245~1250 (in Chinese))
- 15 杜涛, 吴巍等. 海洋内波的产生与分布. *海洋科学*, 2001, 25(4): 25~28 (Du Tao, Wu Wei, et al. The generation and distribution of ocean internal waves. *Marine Sciences*, 2001, 25(4): 25~28 (in Chinese))
- 16 方文东, 陈荣裕, 毛庆文. 南海北部大陆坡区的突发性强流. *热带海洋*, 2000, 19(1): 70~75 (Fang Wendong, Chen Rongyu, Mao Qingwen. Abrupt strong currents over continental slope of northern south China sea. *Tropic Oceanology*, 2000, 19(1): 70~75 (in Chinese))
- 17 Li JC. Transient waves in stratified flows. *Acta Mechanica Sinica*, 1983, 15(6): 611~621
- 18 蔡树群, 甘子均. 南海北部孤立子内波研究进展. *地球科学进展*, 2001, 16(2): 215~219 (Cai Shuqun, Gan Zijun. Progress in the study of the internal solution in the northern South China sea. *Advances in Earth Sciences*, 2001, 16(2): 215~219 (in Chinese))
- 19 Cai SQ, et al. A method to estimate the force exerted by internal solitons on cylinder piles. *Ocean Eng*, 2003, 30: 673~689
- 20 Cheng YL, Li JC, Liu YF. The induced flow field by internal solitary wave and its action on cylindrical piles in the stratified ocean. In: Zhuang FG, Li JC, Eds. *Recent Advances in Fluid Mechanics*, Qinghua-Springer, 2004. 296~299
- 21 Orr MH, Mignerey PC. Nonlinear internal waves in the South China Sea: Observation of the conversion of depression internal waves to elevation internal waves. *J Geophys Res*, 2003, 108 (C3): 3064~3076
- 22 Sarpkaya T, Isaacson M. *Mechanics of Wave Forces on Offshore Structures*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1981
- 23 Chakrabarti SK. *Fluid Structure Interaction in Offshore Engineering*. Computational Mechanics Publication, 1994
- 24 Caruthers JW. *Elementals of Marine Acoustics*. Elsevier Company, 1977
- 25 Wunsch C, Ferrari R. Vertical mixing, energy and the general circulation of the oceans. *Ann Review of Fluid Mech*, 2004, 36: 281~304

## BILLOW UNDER THE SEA SURFACE — INTERNAL WAVES IN THE OCEAN

LI Jiachun

(Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100080, China)

**Abstract** The stratified structure due to temperature and salinity in-homogeneity in the ocean is firstly presented in the current paper. With minor restoring force, the internal wave is characteristic of larger amplitude and lower frequency than the counterpart of the sea surface wave. Internal waves occur along the belt of continental edge with suitable stratification, current and topography in various forms of internal tide, internal soliton etc. on this planet. The activities of internal waves appear as hidden trouble for offshore structure safety, background noise in the underwater acoustic channels and a “stirrer” for abyssal mixing. We have observed various applications in ocean engineering, global environment and underwater acoustic exploration.

**Key words** internal wave in ocean, internal tide, stratification, morison formula, underwater acoustics, oceanic general circulation

(上接第 13 页)

1997, 28(3): 275~277(Zeng Tingying, Qiu Yong, Du Jinhuan, et al. Studies on the technologies of preparing microporous silica glass materials III—Preparation of microporous silica spheres. *Journal of Functional Materials*,

1997, 28(3): 275~277(in Chinese))

21 Tsukada M, Goto K, Yamamoto Reo H, et al. Metal powder granulation in a plasma-spouted/fluidized bed. *Powder Technology*, 1995, 82: 347~353

## REVIEW ON PREPARATION OF MICROSPHERES

FU Xianhui SHEN Zhigang

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**Abstract** The granules prepared in powder production have many kinds of forms. Microspheres have so many outstanding properties which other irregular granulas do not have such as good fluidity, high pile density, good dispersion and decreasing stress concentration as the filler of the composite, that they have been paid more attentions in productions and daily life. In this paper, advances in preparation methods as well as its principle and applications of solid, hollow and porous microspheres in recent years are reviewed.

**Key words** microsphere, preparation, principle, application