



大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室研究进展

王 暄

中国科学院大气物理研究所, 大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

2006 年大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室 (State Key Laboratory Modelling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, LASG) 在国家 973 项目、国家自然科学基金委重大、重点项目、创新研究群体科学基金、院创新团队国际合作伙伴计划项目、院方向性项目等的资助下, 在天气气候动力学、气候模式发展、可预报性研究、上层海洋-低层大气生物地球化学与物理过程耦合研究和计算地球流体力学等方面取得重要进展。

1 LASG 气候系统模式的新进展

1.1 大气环流模式研究的新进展

在对全球格点大气环流模式 GAMIL (grid-point atmospheric model of IAP LASG) 评估的基础上, 改进了模式积云对流方案, 使得模式对降水的模拟能力有了明显提高, 能够较好地模拟出 20 世纪年平均的陆表气温的变化, 模拟出南方涛动指数的演变。在 GAMIL 中引入了气溶胶微物理过程, 通过评估发现, 模式对硫酸盐气溶胶的模拟结果较好。

通过美国国家大气研究中心 (National Center for Atmospheric Research, NCAR) 第 5 代耦合器 cp5, 实现了高分辨率全球大气环流谱模式 (SAMIL-R42L26) 与 NCAR-CLM2.0 陆面过程模式的耦合, 大大提高了对表面感热、温度、降水率、潜热通量和海平面气压场的模拟能力, 能较好地模拟亚洲季风区地表感热和潜热的季节演变趋势。

1.2 大洋环流模式研究的新进展

针对 Tracer 平流和短波穿透两个与耦合模式中赤道太平洋“冷偏差”(cold bias) 相关的过程进行了深入研究。在增加水平分辨率和调整垂直分辨率的基础上, 初步建立了一个印度洋海盆的、水平分辨率为 $(1/4)^\circ$ 的模式, 可以更好地模拟出西边界流等重要的环流。在区域海洋模式方面, 完成了南海 $(1/12)^\circ \times (1/12)^\circ$ 高分辨率区域海洋模式及其开边界处理, 利用观测的开边界流量资料对南海环流的季节变化进行了计算, 考察了对高分辨率模式所实施的开边界处理方法的实用性。完成了渤海、黄海、东海海洋环流模式和生态模型连接, 初步实现了物理场对生态场的驱动, 为进一步的海洋生态环境研究打下了基础。发展并完善了中国近海的基于三维变分方法的通用海洋资料同化系统 (ocean variational analysis system, OVALS), 初步结果显示该系统能较好地揭示中国海的海洋状况。

1.3 海冰模式研究的新进展

研究了不同的海冰表面反照率参数化方案对海冰模拟的影响, 以及在 CO_2 加倍情景下, 海冰对不同的海冰表面反照率参数化方案的响应。

设计了一个更为合理的海冰表面反射率参数化方案和一个描述表面融池变化的参数化方案, 在国际上第 1 个利用全球气候系统模式给出的对北极表面融池的模拟, 与现场观测资料非常吻合。这是全球气候系统模式发展的一个创新点。

揭示了北太平洋冬季海冰的年际变化存在着两种模式: 白令海与鄂库次克海的海冰呈偶极子振荡和白令海与鄂库次克海的海冰呈同位相关关系。

1.4 陆面过程模式研究的新进展

发展了植被分层、辐射光分象限的精确计算方案 (generalized layered radiative transfer model, GRTM) 和相应的简化方案。同时针对这两个方案, 推导了植被底部土壤不同反照率下计算植被内辐射传输的渐近展开的传输方案。并在分层模式 (GRTM) 基础上, 研究了原二流传输方案的可靠性, 取得了有意义的结果。建立了一个辐射分 9 个角度分区、叶倾角也分 9 个分区、分层分两叶的几何光学冠层辐射传输模式。通过个例试验证明上述模式可以简化为辐射分 3 个角度分区、叶倾角也分 3 个分区的冠层辐射模式 (相当于六流传输模式), 它和上述模式具有几乎相同的精度。

对引进的动态全球植被模型 (sheffield dynamic global vegetation model, SDGVM) 进行调试、评估, 利用可获取的全球和区域碳通量观测资料、遥感资料、清单普查资料及模型模拟结果对 SDGVM 进行校验、改进, 最终建立改进版本的 M-SDGVM (modified SDGVM) 模型。

1.5 耦合气候系统模式研究的新进展

以大气环流谱模式 SAMIL-R42L26 为大气分量模式建立了可插拔的海-陆-气-冰“非通量调整”的直接耦合的气候模式系统 FGOALS-s。在最新版本的耦合模式 FGOALS_g1.1 中改进了海洋模式的高纬度滤波方案、海冰耦合方案, 使得单独海洋模式和耦合模式中北大西洋经向翻转环流和经向热输送强度明显增加。在 FGOALS_g 的基础上, 发展了一个“快速”耦合版本, 目前该模式已经被兄弟研究单位应用于太平洋年代际变率等模拟研究中。

利用海气耦合模式, 讨论了北大西洋年际气候变率的机

理。利用耦合模式 FGOALS 进行全新世中期和末次盛冰期的数值模拟,并将模拟结果与参加 PMIP2 古气候比较计划的其它模式进行对比分析。利用 FGOALS_g1.0 耦合气候模式控制试验、加倍试验模拟结果和 NCAR/NCEP 资料研究了人类活动影响引起的全球变暖对热带大气季节内振荡特征的可能影响,得到了一些有意义的结论。

1.6 区域气候数值模拟研究的新进展

利用美国最新的区域气候模式 WRF 成功再现了 1998 年与夏季季风紧密联系的两次梅雨过程,并且开展了一系列的敏感性试验。

选取 1998 年夏季长江流域的洪涝事件,利用区域气候模式 MM5 在次季节尺度内进行了模拟。在给定合适的大尺度外源强迫,选取较合理的模式物理过程,提高模式分辨率的情况下,MM5 模式一定程度上能够再现 1998 年夏季长江流域的异常洪涝灾害事件,为下一步降水的发生发展机制分析奠定了基础。

2 天气气候动力学研究的新进展

2.1 平流层研究的新进展

围绕表征大尺度环流调整的北半球 Annular Mode 的演变过程,提出了冬季环流季节尺度振荡的一种新机制。

通过对太阳活动活跃状态不同,将平流层环流进行合成并比较,发现如果根据准两年振荡 (quasi-biennial oscillation, QBO) 位相的不同再对太阳活动强弱不同情况进行分类研究,得出的结果也有很明显的不同。这也说明 QBO 的位相在太阳活动对北半球平流层异常环流的影响中也具有一定的调节作用。

2.2 夏季风研究的新进展

以对流层中上层大气经向温度梯度为指标确定了历年孟加拉湾东部地区夏季风爆发日期序列,分析了其年际变化规律与外部影响因子的联系。通过数值试验,研究了亚、非地区热带次尺度的海陆分布和青藏高原大地形在亚洲夏季风形成中的作用。

2.3 厄尔尼诺现象研究的新进展

利用不同的海洋观测资料,分析得到在过去 50 年厄尔尼诺现象 (ENSO) 变率的振幅增强了 70%。观测资料的结果表明在 ENSO 变率的长期变化过程中,热带海洋的垂直温度结构变化具有重要作用。

2.4 副热带高压研究的新进展

利用 1958 年~1998 年台风资料,对台风路径进行分类,选出 3 类常见路径作为研究对象,通过合成分析,证实不同的台风路径所对应的副热带高压形势不同。在此基础上,利用气候模式 R42L9 在不同的初始场中加入相同的温度扰动,成功模拟出西行和北上路径的台风,验证了不同副热带高压形态对台风路径的不同影响。

选取 1999 年 6~7 月间一次典型的强降水过程,利用位涡收支分析了降水和副热带高压之间的相互作用过程,并通过片断 Ertel 位涡反演,对此次强降水过程中副热带高压形态变异机制进行了定量诊断分析。

2.5 高原研究的新进展

利用一个全球原始方程模式进行一系列理想试验,研究了青藏高原地形和热力作用对亚洲夏季环流的影响及南亚高压东西振荡的可能原因。

通过分析对参加政府间气候变化小组 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 第 4 次气候变化评估的两个耦合模式模拟结果的分析,将高原气候变暖与温室气体增加联系在一起。

2.6 大气扰动位能理论及应用研究的新进展

为了描述局地能量的有效性特征,在研究绝热大气过程性质的基础上,提出了大气局地扰动位能的新理论,构建了局地大气能量学的理论框架,研究了位能的概念、表达及其时空结构,对认识和研究局地大气环流的变化有重要的价值。

2.7 夏季旱涝研究的新进展

研究了长江中下游夏季旱涝并存及其异常年海气特征,及长周期旱涝急转的基本特征。对长江中下游地区夏季长周期旱涝急转现象 (分旱转涝和涝转旱两种类型) 进行研究,为长江中下游夏季长周期旱涝急转现象的预测提供了有参考意义的前兆信号。

3 可预报性研究的新进展

3.1 可预报性研究的新理论——非线性误差增长动力学及其应用

针对以往线性误差增长理论的局限性,利用非线性动力系统的理论和方法提出动力系统非线性误差增长动力学理论来研究非线性动力系统的可预报性。定义并研究了非线性局部李氏及其动力学意义,由此揭示动力系统非线性误差增长过程和规律,证明了对于混沌系统其全局平均相对误差增长的饱和值定理,给出了饱和值的理论估计。

3.2 厄尔尼诺现象可预报性研究的新进展

编写 ENSO 预报模式 Zebiak-Cane 模式的切线性和伴随模式,建立了它的非线性优化系统,用条件非线性最优扰动方法 (conditional nonlinear optimal perturbation, CNOP) 研究了 ENSO 事件的最优前期征兆、最大预报误差和春季预报障碍问题。

用 CNOP 方法研究了 Zebiak-Cane 模式 ENSO 事件的春季可预报性障碍问题,提出了春季可预报性障碍的一种可能机制,初步考察了 CNOP 在集合预报研究中的应用。

用海洋同化资料 (simple ocean data assimilation, SODA) 资料诊断分析了 El Nino 和 La Nina 强度随年代际变化的情况。用理论 ENSO 模式,再现了 ENSO 不对称性的年代际变化。依据该模式,提出了 ENSO 强度不对称性发生年代际变化的一种可能机制,即非线性在年代际尺度上的变化导致了 ENSO 强度不对称性的年代际变化,从而为 ENSO 的非线性特征提供了一个新的证据。用 Zebiak-Cane 模式,进一步强调了非线性温度平流在 ENSO 不对称性及其年代际变化中的主要作用。

4 上层海洋—低层大气生物地球化学与物理过程耦合研究的新进展

4.1 出海观测及资料分析

2006 年 4 月 17~30 日在黄海和东北北部进行了为期两周的海上观测。在此期间进行了海上大气气溶胶光学厚度、气溶胶采样、太阳短波辐射和其他气象要素的观测,并参与进行了关于海洋初级生产力对铁离子响应的船基围隔实验。

4.2 沙尘气溶胶入海通量的数值模拟研究

采用数值模拟的方法,综合考虑沙尘气溶胶在亚洲内陆的

释放、远距离输送和沉降过程, 得到 2002 年 3 月 18~22 日一次强沙尘暴过程中沙尘气溶胶的输送过程和在中国近海(渤海、黄海、东海和南海)以及日本海的入海通量, 为进一步研究沙尘对这些海域生物的影响提供依据。

4.3 海洋初级生产力时空分布特征的研究

采用卫星遥感的叶绿素(宽视场海洋观测传感器(sea-viewing wide field-of-view sensor, SeaWiFS)和分辨率成像光谱仪(moderate resolution imaging spectrometer, MODIS)的合成产品)、光合作用有效辐射资料(SeaWiFS), 以及同期海表温度数据(MODIS), 通过修正的(vertically generalized production model, VGPM)算法, 反演估算了 2003 年~2005 年中国近海海域真光层海洋初级生产力的状况。

5 计算地球流体力学的新进展

基于三维变分映射资料同化(3-dimensional variational data assimilation of mapped observation, 3DVM)方法与理论, 建立了 LASG/IAP 气候系统海洋模式(LASG/IAP climate system ocean model, LICOM)的变分同化系统: LICOM-3DVM, 利用美国环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP) $1^\circ \times 1^\circ$ 的

海表面温度再分析美国国家海洋和大气管理局最优插值海表温度(NOAA optimum interpolation sea surface temperature, OISST)的周平均资料作为观测进行了同化试验发现, LICOM-3DVM 系统能够消除模式在同化前在赤道中太平洋的冷偏差、在南美沿岸的暖偏差, 尤其明显改进了模式对 ENSO 事件的模拟。

最新提出了一种基于历史拟合投影的新的四维变分资料同化方法(4-dimensional variational data assimilation, 4DVar): 基于历史样本拟合投影的四维变分映射资料同化(historical sample fit projection 4-dimensional variational data assimilation, HFP-4DVar)。应用此方法, 首次在国内建立了基于非顺序同化的 LICOM-4DVar 系统, 并在初步检验中取得较好效果。

在去掉 3DVM 中需要所有模式自由度都有观测的苛刻假设基础上, 提出了一个适用于一般情形的 3DVM 代价函数, 并与 4DVar 的代价函数一致起来, 从而可用类似 HFP-4DVar 的求解技术进行快速求解, 并以此为基础建立 LASG 基于 REM 的先进有限区域暴雨数值预报模式(advanced regional eta-coordinate numerical prediction model, AREM)的新同化系统: AREM-3DVM 系统, 使之具有快速同化常规和非常规资料的能力, 为 AREM-3DVM 系统的业务化打下了坚实基础。

海岸和近海工程国家重点实验室近期研究工作简介

杨晓昕

大连理工大学, 海岸和近海工程国家重点实验室, 大连 116024

1 实验室概况

大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室 1986 年由国家计委批准筹建, 1990 年通过国家验收后被批准正式对国内外开放。1994 年、1997 年和 2003 年 3 次通过了国家计委/科技部委托国家自然科学基金委组织的评估。现任实验室主任董国海教授, 实验室学术委员会主任由中国工程院院士, 国家设计大师, 海岸动力及海岸工程专家谢世楞担任。实验室现有水利工程、土木工程两个一级学科博士点和博士后流动站, 其中港口、海岸及近海工程与水工结构工程两个二级学科为国家重点学科。实验室现有从事科学研究及实验技术工作的固定在编与固定非在编人员近 60 人, 其中: 两院院士 4 人, 长江学者奖励计划特聘教授 4 人, 国家杰出青年基金获得者 5 人, 入选教育部跨世纪人才培养计划 3 人。

实验室下设有 3 个分实验室: 水动力学实验室, 结构实验室和抗震实验室。主要研究方向为(1)浪、流、冰、风等动力因素对建筑物及海岸泥沙的作用;(2)海岸和近海环境的动态分析和保护的研究;(3)海岸和近海工程结构的分析, 设计与材料研究;(4)海岸和近海工程结构的抗震研究;(5)海岸和近海工程数值模拟试验与可视化的研究。

实验室拥有可模拟海浪、海流和潮汐等综合作用的多功能综合水池, 多个功能各异的波浪水槽, 电液伺服二维水地震模拟系统, 电液伺服结构疲劳试验系统, 500 kN 级大型高精度静动三轴仪, 土工静力-动力液压三轴-扭转多功能剪切仪, 基于 PIV&LIF 的流速场、浓度场同步测试系统

等先进的设备与仪器, 是代表国家水平及在世界上有相当影响的海岸和近海工程实验研究基地。十五期间实验室新建成了非线性波浪水槽系统(包括长 60 m、宽 4 m、深 2.5 m 的波流水槽、造流系统和液压伺服不规则波造波机系统), 海洋污染微环境模拟系统(准椭圆形水槽, 水槽直段 25 m, 两端圆弧段半径 3.6 m, 宽 0.4 m, 深 0.6 m), 冰区溢油环境试验系统(包括 2.8 m×3.3 m×2.3 m 的 -30°C 超冷间和 5.8 m×3.3 m×2.3 m 的 -18°C 常冷间, 2 台 MCF-150PJ 压缩机及控温仪表等)等具有特色的先进设备。

2 近期研究进展

2.1 近岸波浪传播变形、破碎和港内波浪计算理论与方法

近岸波浪传播变形和港内波浪计算: 波浪传播过程中存在着自由水面非线性和海底影响问题, 一般根据相互间的强弱关系应用浅水理论和一般水深理论加以分析。对于波浪在海岸上的传播问题, 自由水面非线性和海底影响的强弱关系不断变化, 因此上述方法在工程应用中有时十分不便。研究中我们建立了具有高精度色散性和波面非线性、适应于不同地形和边界条件的高阶 Boussinesq 水波方程。所建方程的色散性关系具有 4 阶波高精度, 使方程适应的水深范围进一步拓宽; 非线性控制方程 Boussinesq 方程具有二阶波高精度, 能足够精确地模拟大波高波浪在浅水中的传播过程。应用有限元方法研制了基于高阶 Boussinesq 水波方程的海岸、港内波浪计算分析软件, 该软件较目前工程上普遍采用的有限差分方法分析软件, 更适用于边界复杂的海岸和港口工程问

题, 该软件多次应用于实际工程的港口波浪数值模拟试验。

近岸波浪破碎和次生长波: 波浪向岸边传播过程中由于水深逐渐变浅, 波浪会发生破碎, 波浪破碎后波浪高度会相应减小, 波浪设计指标相应降低, 波浪破碎后还会生成周期的次生波浪, 对海岸工程和海岸地貌带来影响。对于不规则波浪在海上的传播问题, 开展了大量的物理模型试验和理论分析, 总结出了既可适用于纯波, 又可适用于波流共存场的统一的不规则波破碎指标, 其中大波破碎指标属首创。建立了波浪谱在缓坡上的变形及破碎的时频域混合交替计算方法, 保证了计算快捷、方便而准确, 实现了破后波的直接数值模拟, 计算结果与实验结果符合良好。对于波浪在海上的传播、破碎而产生低频长波问题, 我们将欧拉方程在水深上平均和对风波在时间上平均, 建立了海岸低频波浪模型和 TVD 高分辨率差分数值求解方法, 应用数值模拟和物理模型实验对低频波浪的产生机理及其对海岸的作用进行了研究。

波浪在水流中的传播变形: 波浪在海岸传播过程常常与水流相遇, 对于水流作用下波浪在岸滩上的绕射问题, 同一空间位置上的波浪在不同方向上具有不同的传播速度, 工程上广泛应用的波浪折绕射缓坡方程对这一物理现象无法反映, 传统模型中都假设波浪在各方向上的传播速度是相同的, 由此产生的误差无人知晓。对于波浪、水流联合在局部岸滩上的绕射问题, 研究中应用积分方程方法提出了一个全绕射的新计算方法, 该模型考虑了波浪在不同方向上具有不同传播速度的特性, 且不仅适用于缓坡, 也适用于陡坡。应用该模型开展了波浪、水流在局部岸滩上的绕射, 波浪、水流在结构物周围绕射的计算, 为传统的缓坡方程等简化模型提供了验证基准。

2.2 海上结构物的波浪作用和新型海岸工程结构型式的研究

波浪对大型海上结构物的作用: 在波浪对海洋结构物作用及结构物动力响应的数值模拟方面, 提出了求解水波与结构物相互作用的一种高阶边界元方法, 该方法可自动消除积分方程中的奇异积分, 避免物面角的计算, 应用简便、有很高的计算精度。在非线性和海洋结构物作用的频域模拟方面, 开展了双色入射波浪与三维结构物作用下的 2 阶和频及差频波浪力, 波浪、水流共同与三维海洋结构物相互作用, 轴对称物体上 3 阶波浪力等方面的研究工作, 提出了自由水面上 2 阶速度势的快速递推算法, 有效、快速地形成了自由水面上 3 阶强迫项, 首次计算了轴对称物体上的 3 阶波浪力和力矩, 求得了三维海洋结构物的波浪阻尼, 海洋平台低频大振幅运动下的波浪爬高等物理现象和问题, 建立了与国际上广泛应用的商业软件 WAMIT 功能相同的 WVDUT 分析软件包。该程序与实验室结果得到很好吻合, 被应用于多项工程实例的计算中, 解决了工程设计的难题, 应用该程序还开展了船舶靠泊能量计算方法的我国港口工程规范的专题研究。

破碎波浪对结构物的冲击作用: 对于破碎波浪对浪溅区结构物的冲击作用问题, 应用湍流数学模型及可以处理多重自由水面的流体体积法 (VOF), 提出了适合 VOF 方法的水体与结构物接触与分离的动边界条件, 和适合 VOF 方法的主动式无反射数值造波机速度边界条件, 建立了无反射数值波浪水槽模型, 数值模拟出波浪冲击过程压力的分布特征及作用在结构物上的冲击荷载, 尤其通过数值模拟方法得到波

浪冲击过程中的负压现象, 填补了国内外有关波浪破碎与冲击数值模型研究的空白。

梳式防波堤新结构研究: 在深水防波堤新型结构型式研究中, 结合大连港大窑湾港区的工程建设, 选取了一种既可透流又可减小水平波浪力的梳式防波堤结构。该种结构型式可减小结构上的波浪作用力、降低结构物自重、轻度影响港内外水域水体的交换能力。通过大量的实验室物理模型实验及相关分析, 得到了结构上波浪力与波浪周期、梳齿长度、梳齿位距及梳齿高度 4 个参数的联合相关公式。该成果已在大连港大窑湾港区岛堤工程中应用, 节省工程造价 6000 余万元, 缩短工期 6 个月。经国家计委组织专家鉴定该项成果达到了国际领先水平。

低反射与低受力的新型海岸结构物研究: 应用理论分析和实验方法对波浪与外壁透空圆墩和斜向波浪与海岸透空沉箱结构相互作用问题做了研究, 将现有的二维理论推进到三维理论。对于透空墩柱, 考察了波浪入射频率、外壁透空率对圆柱上波浪力和周围波高、内部波高的影响。对于斜向波浪与透空沉箱的作用, 研究了前壁透空率、沉箱长度、沉箱宽度、波浪入射角对结构上波浪力和沉箱前、沉箱内波浪高度的影响, 发现了波浪的漫反射现象。目前这一理论和实验成果已成功地应用于香港维多利亚港和大连港矿石码头, 减少了码头前的波浪反射, 减弱了结构上的波浪作用力, 降低了码头高程和工程造价。

深水养殖网箱的水动力学问题研究: 近年来实验室开展了重力式网箱系统优化方面的研究。首先解决了网衣模拟相似律这一难题, 提出了一种新的模拟准则, 经过验证符合良好。通过试验研究了在纯流、纯波以及波流作用下, 锚绳受力随流速、波高、周期以及配重大小等的变化规律。顺流与波浪组合条件下, 下潜方式对锚绳受力规律影响显著。在网箱下潜后, 逆流与波浪组合对网箱锚绳受力最为不利。从安全角度来看, 网箱的最小下潜深度应大于最大波高。开展了单体重力式网箱和组合式网箱水动力特性试验方面的研究。从锚绳受力及浮架运动与波流、网箱组合方式关系上, 以及网箱的网内、网后流速衰减程度上分析, 纵横向排列的网箱组合方式都要优于纵向排列的网箱组合方式。

多层水平板透空式防波堤新结构: 提出了一种由多层水平板组成的新型透空式防波堤结构。通过物理水槽中的规则波模型试验, 并结合基于线性波浪理论建立的数学模型, 探讨了其消波性能和影响因素。试验结果表明, 多层水平板透空式防波堤在相对宽度为 0.25 时, 透射系数小于 0.5, 且对于波浪的反射作用较弱, 反射系数基本保持在 0.4 以下。基于线性波浪理论, 建立了波浪对多层水平板透空式防波堤作用问题的数学模型, 通过分解速度势为对称势和反对称势, 结合特征函数展开法, 给出了该问题的解析解, 其计算结果与试验数据较为吻合。计算结果表明在相同波况的条件下, 该结构的水平波浪力仅约为竖向波浪力的 3%。同浮箱式结构相比, 多层水平板结构可明显降低水平波浪力。

2.3 近海工程结构系统的非线性荷载和其优化设计研究

随着我国经济建设对能源需求的快速增长, 要求我国的海洋工程向更深的海域进展, 开发那里的石油资源, 保证我

国经济建设的持续发展。随着水深的增加,海洋环境趋于恶劣,结构系统的尺度增大、自振频率降低,波浪与结构物的相互作用问题向人们提出新的挑战。由于水深的增加,工程造价将十分昂贵。因此,要求我们对其中的科学问题开展深入地研究,以满足我国深水海洋工程的发展需求。

非线性波浪对结构物绕射的实时模拟:应用高阶边界元方法建立非线性波浪水槽。在频域分析中提出了固角系数和奇异积分的间接处理方法,得到了国内外学者的引用。进一步应用了多极子展开技术于数值波浪水槽,建立了水流绕流的边界元算法,逐步地建立了无界域中的常数边界元算法、无界域中的高阶边界元算法和带有水面的半无限域中的常数边界元算法。

波浪与非线性锚泊系统作用的时域耦合分析:以波浪与码头前系泊船的作用作为工程背景,建立了工程分析模型。该模型采用 B 样条函数拟合护舷、缆绳的非线性受力-变形曲线。对于波浪与码头前系泊船的作用,分别采用两种方法开展了研究:一种是根据频域方法计算波浪对船舶的作用力、船舶运动产生的附加质量和辐射阻尼,通过傅氏变换求得时域内波浪作用力和船舶运动的脉冲响应函数;另一种是采用时域方法直接计算求解时域波浪作用力和船舶运动引起的流体作用力。在实验室中还开展了波浪与码头前系泊船作用的实验工作,测量波浪作用下系泊船舶的 6 个运动分量,计算结果与实验结果吻合良好。

2.4 动力作用下近海海域污染物迁移规律研究

近年来,实验室建立了基于 PIV 和 LIF 的速度场、浓度场同步量测系统,对污染物团在波浪作用下扩散的基本特征和扩散系数进行了试验研究,在高精度的对流扩散方程、两相湍流双流体模型,包含多个水质参数波流作用下的污染物扩散输移的数值模型,不同层次的近海水域三维水动力学和水质模型等方面开展了深入地研究。

针对波浪向近岸传播过程中由于折射、绕射、反射、汇聚等作用使得波浪场中局部复杂区域波向角不易确定的特点,且考虑到不同波浪场特征,将波浪辐射应力的计算分别和椭圆型缓坡方程、抛物型缓坡方程、双曲型缓坡方程中的变量结合起来,从而使得所采用的数学模型可用于相对较复杂的近岸波浪场的研究。

在潮流场的数值模拟中,建立一个考虑复杂海洋动力因素作用的三维环境潮流动力学模型。在此基础上,确定海洋溢油的轨迹与归宿预报模型,该模型考虑泄漏在海洋中的油,由表层油膜和分布在整个水体中的悬浮油珠两层组成,采用 Lagrangian 追踪法模拟油膜的迁移扩散。在此方法中溢油被看成大量不同尺寸但都具有油的特征的小油团,从而可以方便地考虑油膜的切变、湍流扩散和掺混过程。油的传输过程包括对流、扩展、紊动扩散、附着在岸边以及沉降到海底等过程,转化过程包括挥发、溶解、乳化。此外,溢油模型还考虑光化学反应、水解反应以及生物降解等过程,这些化学过程能够改变油的特征以及减小油的污染。模型可用于油轮事故性溢油应急计划系统,指导清理人员设置围油栏、清理残油,减少油污带来的环境灾害。

2.5 海冰灾害形成机理、冰荷载及其与建筑物的动力相互作用

现场海冰环境条件调查:利用渤海 3 个油田的 4 座海洋石油平台建立了全方位的海冰观测系统,该系统的观测内容与技术指标优于国外同类观测系统,达到了国际领先水平,已有多名国外学者到观测点进行合作研究。通过现场观测建

立了我国渤海地区冰力函数与冰力谱,该成果已经被 ISO 抗冰结构设计标准所引用。另外,每年冬季在渤海沿岸也进行了海冰条件现场观测,特别是沿岸堆积冰的观测。针对辽东湾海冰特点,利用多年的海冰调查结果,提供渤海不同区域冰厚设计参数,提出辽东湾海冰冰层利用已知气温、冰下水温和冰厚预报压缩强度的模型。在实验研究的基础上,获得渤海海冰力学性质与物理性质的关系;建立了应用气温、水温、冰厚度和冰期描述冰力学参数的模式。该模式成为渤海海冰工程设计和结构物冬季安全运行管理的新基础;利用历史资料,引入重现期的概念,2003 年完成了基于渤海海冰物理和力学性质的渤海海冰工程区划。2002 年~2006 年期间先后参加了中国第 19 次、21 次、22 次南极科学考察和中国第 2 次北极科学考察,德国韦德尔海南极冬季科学考察,对极区的海冰物理性质做了研究。这些研究指导了我国海冰数值模式参数化,提高了海冰工程中冰物理力学性质的认知深度。

海洋平台结构冰致振动机理:基于多年原型观测与室内冰破坏机理试验研究,提出了冰与平台作用存在 3 种动冰力模式;首先提出冰脆脆转变区的裂纹损伤行为是导致平台自激振动的物理机制;系统研究了安装破碎碎体的动冰力。分析了工程中普遍应用的 Korzhavin-Afanasev 公式和 Schawz 公式,提出了统一的静冰力模型。考虑自激振动和强迫振动的耦合效应,提出了动冰力模型的一般形式,给出了挤压破坏、屈曲破坏和弯曲破坏冰力系数函数。应用该动冰力模型分析了自激振动产生的条件,指出冰屈曲破坏和弯曲破坏动冰力可以作为强迫振动模型,冰挤压破坏动冰力则需要考虑冰力系数函数与冰阻尼的耦合效应。应用冰力自激振动模型,推导了结构冰激振动的无量纲运动方程;由运动稳定性理论导出了自激振动产生的判据。

海上结构物冰力作用的非冻结合成冰模拟试验:基于对渤海海冰物理和力学性质的认识,在总结国际冻结和非冻结模型冰性能的基础上,成功地研制出一种 1:20~1:30 比例尺目标值的非冻结合成材料(DUT-1 模型冰,中国发明专利 ZL00104621.7)并建立了相应实验研究技术设备系统。该技术可以在不建造维护费用极高的低温冰池条件下,利用现有的试验设备模拟海洋动力环境条件,研究海冰的漂移及与结构物相互作用,特别在模拟海冰与结构物相互作用方面具有其独特的优势,为我国海上结构抗冰试验研究提供新的途径。应用该技术给出了半圆型防波堤冰荷载计算方法,填补了我国渤海结冰海区半圆型防波堤所受冰压力计算方法的空白。首次给出了钢管桩高桩梁板码头端部结构段(迎冰面)钢管群桩各个排架的冰力和掩蔽系数,作用于码头端部群桩上的总冰力,以及冰阻塞、堆积和破碎冰的清理情况。得到海冰与大直径混凝土圆沉箱结构作用的最大冰力与直径、冰厚比值的关系。

2.6 海洋平台结构的安全防护

海洋平台结构安全评定的理论与方法:系统地研究了海洋环境极值荷载、疲劳荷载及荷载组合的概率模型,统计得到了我国渤海风、浪和海冰的极值和疲劳环境要素的概率分布,提出了现役平台结构安全评定的环境荷载标准。实践应用了腐蚀、凹坑、裂纹、海生物附着和地基冲刷等损伤构件的抗力退化分析方法;建立了海洋平台结构累积损伤与抗力衰减的关系,并试验研究得到了服役结构钢材性能劣化的定量结果。提出了海洋平台结构整体安全度评定的层次分析法、强度储备比汇总法、结构极限承载力分析法以及结构构件可靠度和体系可靠度分析方法等多级安全评定方法;海洋平台结构维修等级的多因素模糊综合决策方法以及基于安全评定

结果制定检测和维修方案的原则和方法。以海洋平台结构 (inspect, maintenance and repair, IMR) 数据库和结构分析专用程序 ENSA 为核心, 集成开发了有自主知识产权的海洋平台结构检测维修与安全评定软件系统, 该系统可以实现平台结构从设计、制造、安装、运营维护到报废的全寿命安全管理。该系统已多次用于渤海 8 号生产平台安全评定, 为延长平台结构 3 年使用期提供了安全保障; 该系统还用于渤海 JZ20-2MUQ 平台基于构件和体系可靠度的安全评定, 是我国现役海洋平台结构的首次工程实例。

海洋平台结构冰振控制装置与振动控制系统: 根据海洋平台的特点和要求, 研制开发了以黏滞流体为介质的耗能减振装置, 提出了用于大型结构控制的双出杆油缸式黏滞阻尼器的 3 种基本形式: 间隙式、孔隙式和组合式。采用双出杆油缸的方式, 构造简单, 能够提供较大的阻尼系数与阻尼力, 可以很好地适用于大型结构的减振。从黏性流体的本构关系出发, 分别推导出了阻尼介质为幂律流体 (包含牛顿流体) 和宾汉流体时, 双出杆油缸间隙式、孔隙式与组合式 3 种阻尼器的阻尼系数、阻尼力与速度的关系等理论公式。为阻尼器的设计及阻尼器各项参数的选取, 提供了理论基础。设计制作了多个足尺的黏滞阻尼器, 并进行了相应的性能试验, 结果表明该阻尼器具有良好的耗能能力。对磁流变液的研制、性能测量装置的开发, 以及减振驱动器的设计、开发、阻尼力模型的建立、响应时间的分析等几个方面进行了系统的理论分析和试验研究。经过与国内外不同流变液的性能比较表明, 配置的磁流变液已经达到了国际先进水平。设计制作了剪切阀式磁流变减振驱动器, 提出了此类减振器的磁路计算公式。

海洋平台结构的健康监测与安全预警系统: 针对海洋平台结构长期监测的特点和需要, 研制开发了封装光纤光栅传感器、压电薄膜传感器和疲劳寿命传感器, 提出了光纤光栅应变监测的温度补偿方法和传感应变多层界面传递的误差修正方法; 建立了结构智能传感监测集成系统和无线传感网络系统; 提出了变时基海洋平台结构模态参数识别方法以及同时利用结构整体响应和局部响应进行结构损伤识别的方法; 编程实现了结构参数识别、损伤诊断、模型修正、实时安全评定和可靠度及预警程序, 这些程序模块已集成应用于渤海 JZ20-2MUQ 和 CB32A 海洋平台结构的实时监测系统中。

2.7 海底管线的损伤机理和健康诊断研究

海底管线内流对管线动力特性及动力响应的影响: 采用有限元数值模型的耦合计算方法, 探讨了内流对海底悬跨管线动力响应的影响。研究中管线的控制方程采用三维弹性动力学方程, 内部流体的控制方程采用不可压缩的 N-S 方程和连续方程。用有限元程序进行管线和管内流体的单元离散, 管线采用 4 节点线性壳单元, 流体采用四面体单元, 流固边界采用可移动网格。通过在流固边界上进行反复迭代, 实现管线及其内部流体系统的三维流固全耦合计算。取管线长度为 60 m, 外管径为 0.22 m, 壁厚为 10 mm, 弹性模量为 210 GP, 泊松比为 0.29, 两端支撑采用简支; 管内流体取均质原油, 密度为 872 kg/m^3 , 运动黏度为 $500 \text{ mm}^2/\text{s}$ 情形进行了计算, 得到管流耦合系统的固有频率, 并与经验方法、近似的理论公式的计算结果进行了比较。研究发现: (1) 对于管内存在流体流动的管线系统, 内流速度的增加将降低管线系统的固有频率。(2) 内流速度对于周期性波浪力作用下的受迫振动位移响应存在一定影响。(3) 位移响应的差别主要是由于波浪初始冲击产生管线系统自振和同一周期受迫振动叠加造成

的。

海流作用下海底管线周围的冲刷速度和冲刷地形试验研究: 当海底管线位于冲蚀海床上, 海流可能引起海底管线周围的局部冲刷, 造成海底管线产生悬跨, 直接威胁海底管线的安全。近年来国内外学者主要针对二维固定管线开展波流作用下的冲刷研究, 对于三维管线冲刷地形和冲刷速度的研究极其少见, 而现场海洋环境基本都是三维冲刷的情况。试验在大连理工大学海岸和近海国家重点实验室新建的非线性波浪水槽 (长 55 m, 宽 4 m, 深 2.5 m, 最大水深 1.8 m) 中进行, 试验管线长度为 4 m, 采用有机玻璃制作, 并在内部填充环氧树脂进行刚度加强, 试验水深 0.4 m。采用 ADV 流速仪测量特征流速, 深度探针测量冲刷地形。对海流作用下, 不同时刻、不同埋深、不同来流角度下, 海底管线周围的冲刷速度和冲刷地形进行试验。根据试验结果发现: (1) 当埋深率从 -0.2 减小到 -0.4 时, 冲刷宽度与管径比率由 9.16 增加到 13.65, 冲刷速度由 25.94 m/s 减少到 5.27 m/s 。(2) 来流角度越大, 冲刷地形不对称性越大, 冲刷速度减小。

波浪、海流作用下海底管线的动力响应试验研究: 试验工作在大连理工大学海岸和近海国家重点实验室非线性波浪水槽中进行。采用应变片测量管线动力反应, 采用 ADV 流速仪测量特征流速, 采用浪高仪测量波高。管线模型选用玻璃钢制作, 应变片布置在模型管线内部, 以避免影响外部的流场。试验主要研究规则波、不规则波、海流作用下, 不同悬跨高度、不同冲坑长度海底管线的动力响应。试验结果表明: (1) 对于平底固床海流作用情况下, 在试验雷诺数范围内, 垂直于来流方向的振动并不是随悬跨高度单调变化。(2) 对于平底固床波浪作用情况下, 水平方向振动不受悬跨高度影响, 垂直方向振动受悬跨高度影响, KC 数较小时, 悬跨高度越大, 垂直方向无量纲振动幅度越大, 管线主要以波浪频率振动; KC 数较大时, 悬跨高度越大, 垂直方向无量纲振动幅度越小, 管线主要以二倍波浪频率振动, 不规则波浪作用下的规律与规则波浪相同。(3) 对于典型冲蚀固床海流作用情况下, 垂直于来流方向的振动幅度随冲坑长度的增加而增加。

悬跨海底管线的动力模型试验研究: 海底管线的悬跨段作为管线系统的薄弱部分, 在海底管线的地震响应分析中被着重考虑。利用水下振动台进行多种工况的试验, 研究不同管外和管内状态、不同水深、不同悬跨高度、不同激励输入等条件对悬跨管线地震响应的影响。试验结果表明: 管外是否有水对管线的基频和动力响应均有较大影响。相同激励下, 水下管线由于受到水体的阻力作用, 其运动将显著滞后于地面运动, 因此其加速度响应低于管外无水的情况, 而其变形则应大于管外无水的情况。同时, 由于水体的存在, 导致管线响应频谱峰值的降低。双向激励下管线的竖向响应大于仅有竖向激励时管线的竖向响应, 甚至大于双向激励时管线的水平响应。这说明, 水平激励对管线的竖向响应有较大的影响, 不能简单地认为管线在两个方向上的振动是无关的。而双向激励下管线的水平响应十分接近于仅水平激励时管线的水平响应, 即竖向激励对管线的水平响应影响较小。

基于小波包分解的海底管线的损伤敏感特征提取: 发展了一种环境振动条件下、具有严格理论基础的、适用于海底管线的新的损伤敏感特征。首先, 为了理论的完备性, 对信

号能量与平均功率的概念以及小波包分解的理论基础进行简单介绍。其次,基于结构随机振动理论,导出了结构响应的平均功率与系统输入以及结构参数的关系。再次,对结构运动微分方程进行小波包分解,建立了小波包分量平均功率与系统输入以及结构参数之间的关系。最后,通过对平均功率百分比(小波包分量平均功率与随机振动响应平均功率之比)与结构参数之间关系的分析,定义了一种结构健康监测的新的损伤敏感特征。基于小波包分解与信号平均功率的损伤敏感特征由结构随机振动理论导出,具有更加严格的数学基础和明确的物理意义。新的损伤敏感特征在环境振动条件下与系统输入无关,克服了以往方法要求必须满足可重复受控激励或脉冲激励的限制,更加适合海底管线的连续在线监测。

基于小波包分解的海底管线的健康诊断方法:基于结构健康诊断的新颖探测思想,首先对基于小波包分解的损伤敏感特征进行选择,确定环境振动条件下结构健康诊断的模式向量。其次,建立多元模式向量的离群值分析算法。再次,建立确定损伤门阈值的 Monte-Carlo 模拟方法。最后,通过对国际结构控制协会(IASC)与美国土木工程师协会(ASCE)建议的 Benchmark 模型的研究,验证本文提出的结构健康诊断的小波包分解方法的应用可行性和有效性。Benchmark 模型的研究结果表明:(1)基于小波包分解的识别算法能够在输入未知的环境激励条件下正确识别结构损伤的出现,可以有效地解决具有较强不确定性的结构健康诊断问题。(2)基于小波包分解的识别算法不但能够识别较为严重的结构损伤,而且可以准确识别结构内部的轻微局部损伤,说明新的损伤敏感特征比基于模态参数的损伤敏感特征更为敏感。(3)基于小波包分解的识别算法具有较强的鲁棒性,不会因为输入未知和观测噪声而发生虚假识别的情况。(4)基于小波包分解的识别算法不依赖于测点的位置,是一种全局性的结构健康诊断方法。

基于时-频联合分析的海底管线的裂纹识别:裂纹是海底管线最为典型的损伤形式之一,它的出现和扩展往往导致海底管线的失效事故。裂纹识别是结构和机械系统健康诊断中较为经典的问题,研究成果十分丰富。但是,以往的工作多是基于裂纹张开假定而开展研究的,很少涉及裂纹在往复荷载作用下(如波、浪、流)的张开和闭合的呼吸行为。已有研究表明,对于呼吸型裂纹,如果仍然采用张开裂纹模型进行损伤识别,不但会导致裂纹程度识别的定量误差,而且会造成裂纹是否发生的定性错误。呼吸行为对裂纹识别具有重要作用。采用 Wigner-Wille 变化技术识别海底管线的瞬时频率,提取瞬时频率为海底管线的裂纹敏感特征,通过瞬时频率带宽判断裂纹的严重程度。通过对带裂纹结构模型的数值模拟研究,验证了以上方法在海底管线中的应用可行性。研究结果表明:(1)基于 Wigner-Wille 变换的时-频联合分析方法可以准确识别海底管线的裂纹发生,它不依赖于海底管线结构模型,是一种裂纹识别的信号分析方法。(2)裂纹深度和采样频率对识别结果具有重要影响:如果结构响应的采样频率足够高,以上方法可以有效识别轻微程度的裂纹;如果采样频率较低,以上方法仅能识别较为严重的裂纹;随着采样频率的升高,识别效果也将显著提高。

2.8 海洋环境因素对海底土体的作用机理

波浪作用下砂土的工程特性试验研究及其本构模型:利用实验室与日本诚研合株式会社最新联合研制的土工静力-动力液压三轴-扭剪多功能剪切仪,针对福建标准砂,在均等固结条件下,进行了包括主应力方向交替变化和主应力方向连续旋转剪切等多种循环应力路径的土工试验。通过对比试验着重探讨了振动过程中主应力方向循环变化模式对饱和松砂不排水剪切特性的影响。具体成果包括:(1)在单调剪切荷载作用下,控制初始固结应力的平均主应力与中主应力系数,变化主应力方向角,通过试验研究探讨了初始主应力方向角对饱和松砂单调剪切特性的影响。(2)在单调剪切荷载作用下,控制初始固结应力的平均主应力与主应力方向角,变化中主应力系数,通过试验研究探讨了初始中主应力系数对饱和松砂单调剪切特性的影响。(3)在不排水循环剪切条件下,通过试验研究探讨了初始应力条件对饱和松砂孔隙水压力增长特性与体积变化特性的影响。(4)在循环剪切荷载作用下,针对不同的初始应力状态,通过试验研究探讨了初始主应力方向、初始中主应力系数对饱和松砂循环剪切特性的影响。

波浪作用下粉砂与黏土的工程特性试验研究:对采用真空预压技术制备软黏土试样的实验室方法进行了改进,建立了黏土试样室内制备方法的装备及其测试方法。与以往方法相比,该法制样时间短、操作简易,所制备土样的饱和度、均匀度适宜于室内土工试验。进而采用复制的原状黏土试样进行了静力三轴试验,建立了非线性本构模型,并探讨了剪切速率对本构参数的影响。

波浪作用下海床-埋置管线相互作用动力分析方法的研究:研究中考虑管线的柔性,分别根据孔隙介质的 Biot 动力固结理论和弹性动力学理论列出了海床与管线的控制方程,应用 Galerkin 法分别对 Biot 动力固结方程和弹性动力学方程进行有限元离散化,得到了海床和海底埋置管线的有限元方程。联立海床和海底埋置管线的有限元方程,并采用 Newmark- β 逐步积分格式对其进行数值求解。在海床-管线的相互作用分析中,在波浪荷载作用下管线与海床土体交界面上可能产生剪切滑移,因此需要设置接触面单元。采用摩擦接触理论同时考虑法向和切向两种相互作用效应。切向相互作用效应包括接触面上的相对滑移和摩擦剪应力。根据 Coulomb 摩擦理论计算海床-管线间的摩擦剪应力 $\tau_{\text{cut}} = \mu p_c$, 式中 μ 为摩擦系数, p_c 为两接触面上的接触压力。当表面拽力小于摩擦剪应力时,接触面沿切向不发生相对滑移。本研究基于以上方法建立了海床-海底埋置管线相互作用的计算模型及其数值算法。以此为基础对波浪荷载作用下海底埋置管线的内应力及其周围海床中动力响应进行了分析。

非饱和土力学实验技术及非饱和土力学基本理论研究:建立了先进的非饱和土力学实验技术条件,以此对于不同的非饱和土和膨胀土,进行了一定的试验研究;开展了非饱和土力学基本理论研究,基于理论分析,探讨了非饱和土的土-水特征曲线和基质吸力,提出了张力吸力与等效吸力的概念,并进行了初步的试验验证。

第十四届国际材料强度大会简介

赵亚溥¹ 杨建锋²

¹ 中国科学院力学研究所, 北京 100080

² 西安交通大学材料科学与工程学院, 西安 710049

2006年6月5~9日,第十四届国际材料强度大会(14th International Conference on the Strength of Materials, IC-SMA 14)在西安古都新世界大酒店举行,会议正式代表322人(其中境外代表200多人),这是该系列国际材料强度大会第一次在中国举办。大会由中国国家自然科学基金委员会、国家教育部、中国材料研究学会、西安交通大学、中国科学院沈阳金属研究所和西安市科技局等单位共同支持。大会主席为J.L. Martin教授,会议组织委员会主席由西安交通大学的孙军教授与中国科学院金属研究所的李守新研究员共同担任。经过评审以后的会议论文,将以特刊形式发表在Materials Science & Engineering A上。

国际材料强度大会是材料强度研究领域最权威的国际系列学术会议,始于1967年,每3年举办一次,会议主题始终围绕材料强度的前沿基础科学问题,是材料强度国际学术界的盛会,是来自世界各地的科学家展示最新成就和思想的平台,在国际材料学界影响巨大。

本次大会安排有大会主题报告(keynote lecture)5个、特邀报告(special lecture)2个、邀请报告(invited lecture)8个,205个口头报告,102个海报报告,参加会议的文章和代表来自27个国家和地区,涉及五大洲。

大会主题报告和特邀报告分别为:

(1) Fifty years old, and still going strong: transmission electron optical studies of materials. (L. M. Brown, 英国剑桥大学卡文迪许实验室);

(2) Analyzing crack-tip dislocations and their shielding effect on fracture toughness. (K. Higashida, 日本九州大学);

(3) Plasticity of tungsten monocarbide. (F. R. N. Nabarro, 南非 Witwatersrand 大学);

(4) A physically based model for strain hardening in FCC crystals. (Kubin, 法国艾图德国家微结构实验室);

(5) Damage and fatigue of actuating heart muscles. (杨卫, 中国清华大学);

(6) Footprints of plastic deformation in nanocrystalline metals. (H. van Swygenhoven, 瑞士 NUM/ASQ Paul Scherrer 研究所);

(7) Mechanisms of deformation in Ni-Based superalloys at intermediate temperature. (M. J. Mills, 美国俄亥

俄州立大学)。

大会的5个分会场以及邀请报告为:

(1) 位错、强度和塑性(dislocations, strength and plasticity)

邀请报告:

(i) Application of micro-sample testing to study fundamental aspects of plastic flow. (M. Uchic, 美国空军实验室);

(ii) Kinematics of polycrystal plasticity: slip systems, lattice rotations and dislocation boundaries. (G. Winther, 丹麦 Risø 国家实验室)。

(2) 断裂和断裂模式(fracture and fracture modes)

邀请报告:

Small-scale mechanical behavior of intermetallics and composites (E. P. George, 美国橡树岭国家实验室)。

(3) 循环变形和疲劳(cyclic deformation and fatigue)

邀请报告:

(i) Fundamental interactions in Ti-and Ni-base alloys in relation to their creep resistance.(杨锐, 中国科学院金属研究所);

(ii) Fatigue of single crystalline silicon: mechanical behaviour and dislocation structures. (M. Legros, 法国 CEMES-CNRS);

(4) 高温变形和蠕变(high temperature deformation and creep)

邀请报告:

Diffusion creep in metals and ceramics. (A. H. Chokshi, 印度理工学院)。

(5) 界面强度与粘附(interfacial strength and adhesion)

邀请报告:

(i) Evaluation of adhesion strength of hard coatings(徐可为, 西安交通大学);

(ii) Adhesion and interfacial strength in MEMS and NEMS(赵亚溥, 中国科学院力学研究所)。

在为期5天的会议期间,为庆祝金属中位错滑移临界切应力——派纳力的发现者Nabarro教授的90岁生日,还召开了专题研讨会。