科学通报 2014 年 第 59 卷 第 25 期：2484 ~ 2489
论 文 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

一种具有时空高分辨率的整体式热流传感器

吴松*, 舒勇华, 李进平, 俞鸿儒

中国科学院力学研究所, 高温气体动力学国家重点实验室, 北京 100190
* 联系人, E-mail: wusong@imech.ac.cn

2013-09-04 收稿, 2014-02-18 接受, 2014-07-15 网络版发表

摘要 为在激波风洞中测量尖锐前缘等曲率半径很小处的表面热流率, 俞鸿儒提出一种整体式热流传感器. 与传统的热流传感器相比, 整体式热流传感器空间分辨率提高了一个数量级, 感应元件的最小尺寸仅为直径0.1 mm, 可以测量*R*0.5 mm的球锥驻点热流. 通过双组元电子束物理气相沉积的方法, 制备康铜薄膜, 形成整体式热流传感器的接点层. 并利用数值计算, 分析了传感器结构对测量精度的影响. 激波风洞试验结果表明, 本文制备的整体式热流传感器频响约 100 kHz, 测量重复性误差小于 10%.

关键词
激波风洞
热流传感器
康铜薄膜
电子束物理气相沉积

高超声速飞行器的热防护是关系飞行器安全的关键问题之一. 在确定防热措施时, 设计部门首先需要知道气动加热输入飞行器表面的热流, 然后才能针对性地设计热防护方案, 包括选用合适的防热材料, 以及进行合理的热结构设计等. 地面模拟试验是预测表面热流的主要途径之一.

地面测热技术分为两类: 一类是热流传感器技术, 包括电阻温度计、热电偶、量热计等; 另一类是光学测热技术, 包括红外测温技术、液晶测温技术、相变涂层、磷光测温技术和温度压力敏感漆等[1,2]. 后者可直观地显示飞行器模型表面温度和热流的分布情况, 但在激波风洞试验中, 流场杂质和模型振动等因素严重影响光学测量的准确性, 因此激波风洞热流测量目前主要依靠热流传感器.

常用的热流传感器主要是铂薄膜电阻温度计和同轴热电偶, 通常为圆柱形. 在欧洲, 德国亚琛工业大学研制的镍铬-康铜同轴热电偶最小直径约 1.9 mm[3]; 而美国 Calspan 实验室研制的直径 1 mm 薄膜电阻温度计[4], 是激波风洞中尺寸最小的圆柱形热流传感器. 国内这两种热流传感器以直径 2 mm 为主, 最小的同轴热电偶直径仅为 1.4 mm[5], 正在研制直径 1 mm 的薄膜电阻温度计. 但是在激波风洞试验中往往采用缩比模型, 驻点、翼前缘、凸台等高热流区域, 缩比后尺寸很小, 即使直径 1 mm 的圆柱形热流传感器也无法满足要求, 需要更高空间分辨率的热流传感器. 因此出现了型面状铂薄膜电阻温度计, 其敏感元件宽约 0.1 mm, 长 1.3 mm, 可用于测量 *R*1 mm 钝前缘驻点热流[6]. 但受限于结构形式, 上述这些热流传感器, 都无法满足实际关心的 *R*=0.5~5 mm 球锥驻点热流测量要求.

为克服这个困难, 俞鸿儒提出一种整体式热流传感器的设计思想. 如图 1(a)所示, 由金属(如铜镍合金)制成的球锥模型, 作为热电偶的一极, 在它的顶点穿入另一种金属丝(如镍铬丝)作为另一极, 两极之间用绝缘层隔离, 在端部用镀膜的方法形成热接点层. 图 1(b)为整体式热流传感器的实物照片. 热电偶测量的是接点温度变化, 因此该整体热电偶的感应元件尺寸, 由接点大小即金属丝直径决定. 以镍铬丝为例, 我们已成功使用的镍铬丝直径低至 0.1 mm.

1 整体式热流传感器的设计原理

整体式热流传感器是基于热电效应设计的. 在一定温度下, 两种不同导体材料中的自由电子密度会有所差异. 在它们的连接处, 由于自由电子扩散,

引用格式: 吴松, 舒勇华, 李进平, 等. 一种具有时空高分辨率的整体式热流传感器. 科学通报, 2014, 59: 2484–2489
英文版见: Wu S, Shu Y H, Li J P, et al. An integral heat flux sensor with high spatial and temporal resolutions. Chin Sci Bull, 2014, 59, doi: 10.1007/s11434-014-0464-6

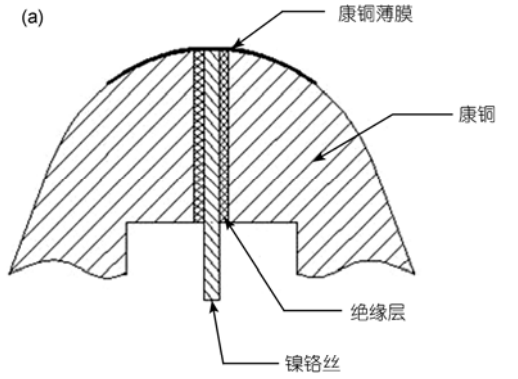




图 1　整体式球锥热流传感器

(a) 原理示意图; (b) 实物照片

产生扩散电动势, 其大小取决于两种材料性质和接触点温度.

如图 2 所示, 两种材料形成一个回路, 温度高的一端称为测量端或热端, 温度低的一端称为参考端或冷端. 通常参考端温度 T_0 保持不变, 则热电势只依赖测量端温度 T, 即

$$E_{\mathrm{AB}}(T,T_0)\big|_{T_0}=E_{\mathrm{AB}}(T). \tag{1}$$

激波风洞试验时间很短, 而镍铬丝较长, 其表面由于气动加热所引起的温度变化, 可以近似用一维半无限体热传导方程描述, 即

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}=\frac{1}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial t}, \tag{2}$$

其中 $\alpha=k/(\rho c)$, k 是热传导系数, ρ 是密度, c 是比热.

若镍铬丝头部表面热流为 $\dot{q}_{\mathrm{s}}(t)$, 则

$$x=0,\quad \dot{q}_{\mathrm{s}}(t)=-k\frac{\partial T}{\partial x}, \tag{3}$$

$$x=\infty,\quad T=T_0. \tag{4}$$

在边界条件(3)和(4)下, 方程(2)有如下解析解[7]:

$$q_{\mathrm{s}}(t)=\frac{\sqrt{\rho ck}}{2\sqrt{\pi}}\left[\frac{2T(t)}{\sqrt{t}}+\int_0^t\frac{T(t)-T(\tau)}{(t-\tau)^{3/2}}\mathrm{d}\tau\right]. \tag{5}$$

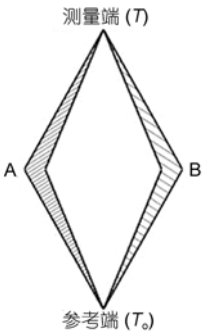


图 2　热电偶测温原理示意图

通过测量得到扩散电动势后, 根据方程(1), 即可获得镍铬丝表面温度随时间的变化历程; 再代入方程(5), 就能得到球锥顶点的热流.

2　康铜薄膜的电子束物理气相沉积

实际研制中, 整体式热流传感器的热接点层质量至关重要. 常用的点焊、机械打磨、化学镀膜等方式, 均难保证精度. 本文采用电子束物理气相沉积(EBPVD)方法, 通过分别精确控制铜和镍的蒸发速率, 在传感器表面生成康铜合金薄膜作为热接点层.

在 EBPVD 过程中, 高能电子经电场加速、磁场聚焦后, 作用于蒸发材料表面. 电子迅速将能量传递给蒸发材料, 使其熔化并蒸发. 电子束可以蒸发各种材料, 蒸发时材料置于水冷坩埚之中, 可以避免坩埚材料对薄膜污染, 这对于制备高纯度活性材料, 特别是活性难熔材料薄膜很有好处. EBPVD 可精确地控制各蒸发源的速率, 以满足薄膜组分和厚度的要求.

中国科学院力学研究所在中国科学院“十五”装备研制项目的支持下, 研制了一套多源电子束物理气相沉积系统(IMCAS-MEBPVD), 该系统由真空和喷流、蒸发和控制、运动和加热、飞行时间质谱仪、稀薄蒸气流场定量预测软件等 5 部分组成[8,9].

如图 3 所示, 在制备球锥热流传感器康铜薄膜热接点层时, 我们用 IMCAS-MEBPVD 的 2 个电子枪分别蒸发 2 种原材料, 每个电子枪都有单独的晶控仪探头来测量和控制其蒸发速率. 具体情况如下: #1 和#2 电子枪分别蒸发金属 Ni 和 Cu, 其纯度分别为 0.99999 和 0.9999, 晶控仪探头分别采用 XTC/2 和 IC/5, 蒸发速率均控制在 1.8 Å/s, 在晶控仪探头表面的总沉积厚度均设定为 6000 Å.

球锥热流传感器置于基片台上, 锥头迎向蒸发

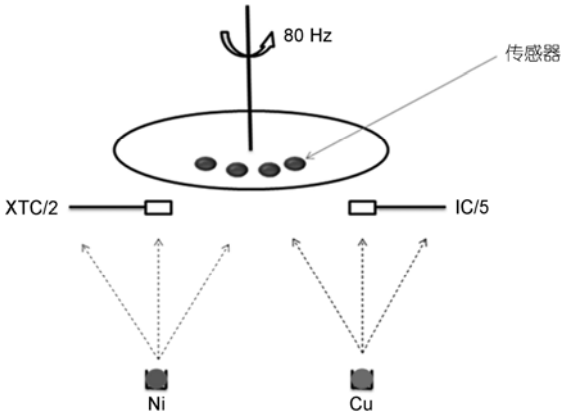


图 3 IMCAS-MEBPVD 系统制备球锥热流传感器康铜薄膜热接点层示意图

源方向. 基片台旋转轴与真空室顶部的旋转电机通过磁流体密封连接, 旋转电机速率为 80 r/min. 康铜薄膜沉积前, 真空室经烘烤除气, 压力约为 5×10^{-4} Pa. 蒸发结束后, 经 ICP-AES 测量, 球锥热流传感表面沉积薄膜厚度约 1.2 μm, Ni 和 Cu 的原子比为 45∶54.

3 整体式热流传感器的响应特性

整体式热流传感器是一个由两种金属材料和绝缘层组成的结构体. 它的热响应特性, 可通过热传导过程的数值分析获得.

在数值分析中, 控制方程为非定常的二维轴对称热传导方程, 采用有限差分方法进行离散和求解. 数值模型中, 整体式热流传感器的头部半径 1 mm, 表面康铜膜厚度为 2 μm, 康铜与镍铬之间的绝缘层厚度为 20 μm. 表 1 给出了所用材料康铜、镍铬和绝缘层(环氧树脂)的密度、比热和热传导系数.

计算中, 传感器表面输入热流 q_0=1.0 MW/m^2. 图 4 给出了康铜薄膜热接点层温度的计算曲线, 它略高于一维半无限体假设条件下的理论解. 若仍采用公式(5)计算热流, 其结果如图 5 所示. 从图 5 可见, 计算出的热流明显高于输入的热流, 但仍基本维持恒定. 这说明虽然绝缘层导致了热电偶内部的热传

表 1 本文研制的整体式热流传感器所用材料性质

材料	密度 (kg/m^3)	比热 (J/(kg K))	热传导系数 (J/(s m^2 K))
康铜	8920	393.1	21.17
镍铬	8730	447.5	19.25
环氧树脂	1060	1960.0	0.20

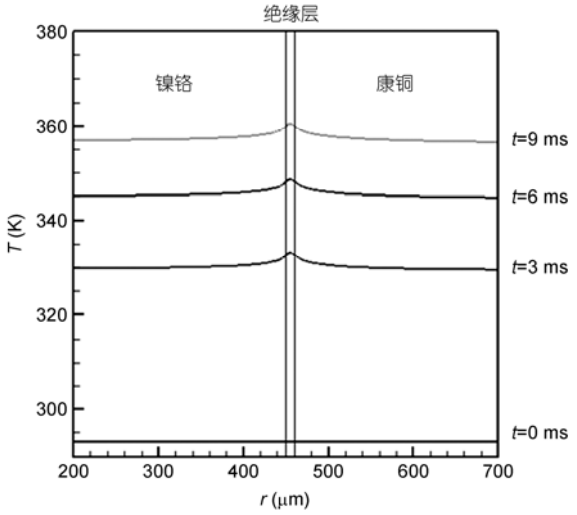


图 4 输入热流为 1.0 MW/m^2 时, 整体式球锥热流传感器表面温度随时间的变化

导过程与一维半无限体不同, 但对导出的热流的影响是基本不变的. 如果能进一步减小绝缘层厚度, 根据均匀材料的一维半无限体假定得出的热流误差可以控制在小于 5%的范围内.

4 激波风洞试验的测量结果

整体式球锥热流传感器, 已实际应用于中国科学院力学研究所高温气体动力学国家重点实验室 JF8A 高超声速激波风洞试验(图 6). JF8A 激波风洞模拟马赫数(M)范围为 6.5~12, 单位长度雷诺数范围为 5×10^5~3.7×10^7 m^{-1}, 试验有效时间为 5~30 ms.

本文试验流场主要参数如下: 来流 M_∞=6.36, 总压 P_0=4.88 MPa, 总温 T_0=560 K, 单位长度雷诺数 Re_∞= 3.2×10^7 m^{-1}, 有效试验时间 20 ms.

图 7(a)给出了整体式热流传感器的典型电信号曲线. 从图 7(a)中可见, 曲线起跳迅速, 准定常流场建立后, 热流信号趋于平稳; 直至稀疏波到达, 信号衰减. 图 7(b)是图 7(a)中信号的起跳段. 图 7(b)中可见, 起跳时间约为 10 μs. 这说明整体式热流传感器频响约为 100 kHz, 完全可以满足试验气流时间为毫秒量级的激波风洞测试要求.

本试验数据结果见表 2. 由表中结果可见, 整体式热电偶的总体重复性较好, 7 次试验结果相对平均值的散差小于 10%, 其中 85%以上的传感器测量散差小于 7%, 甚至一部分数据的散差在 1%以内.

此外, 在预测驻点热流方面有 Fay-Riddell 公式[10]:

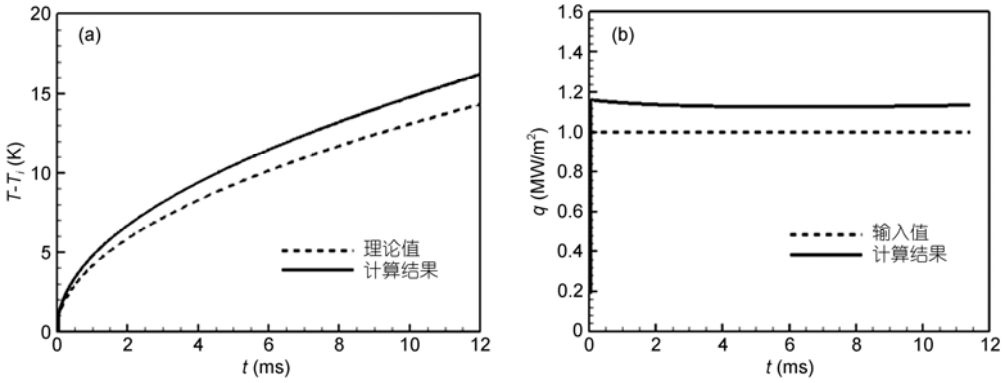


图 5　接点温度和热流随时间的变化

(a) 接点温度; (b) 接点热流

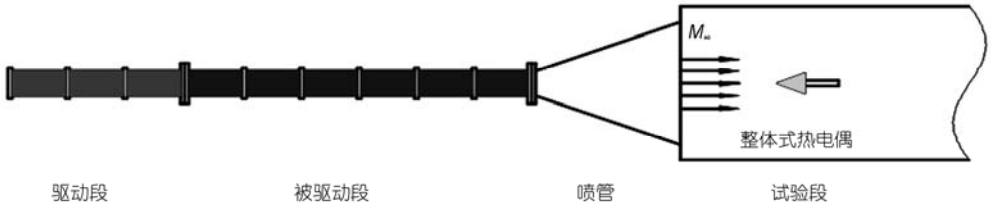


图 6　整体式热电偶激波风洞试验示意图

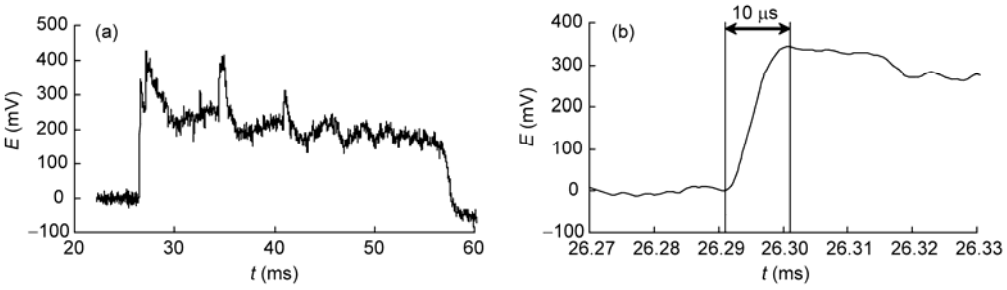


图 7　试验获得整体式热电偶的热流信号曲线

(a) 原始电压信号曲线; (b) 原始电压信号曲线起跳段

表 2　不同头部半径的驻点热流的测量数据(MW/m²)

次数	q_0 (R0.5 mm)	q_0 (R1.0 mm)	q_0 (R2.0 mm)	q_0 (R4.0 mm)	q_0 (R5.0 mm)
第 1 次	1.418	1.042	0.632	0.480	0.421
第 2 次	1.416	1.035	0.612	0.465	0.395
第 3 次	1.467	0.992	0.616	0.450	0.379
第 4 次	1.427	1.030	0.623	0.500	0.356
第 5 次	1.433	0.917	0.688	0.442	0.402
第 6 次	1.392	0.924	0.701	0.433	0.399
第 7 次	1.410	0.914	0.677	0.462	0.388
平均值	1.423	0.979	0.650	0.462	0.391

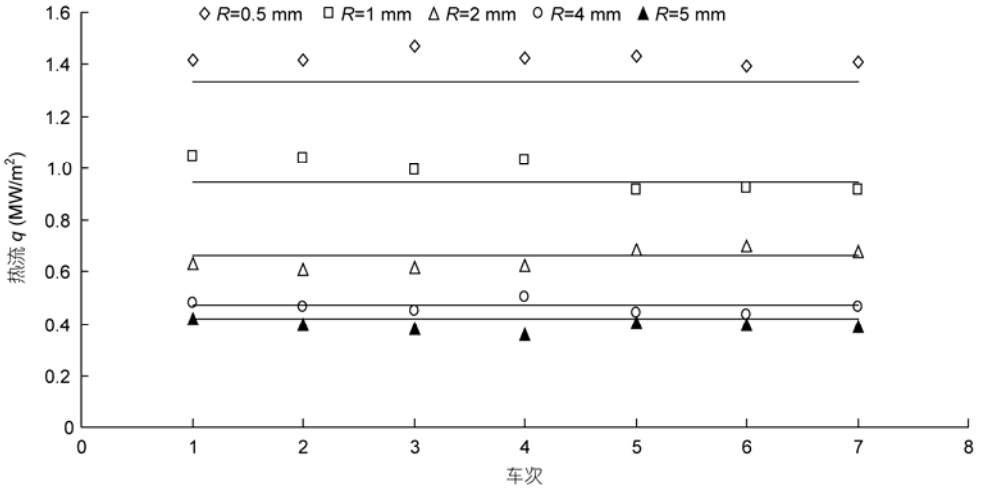


图 8 不同半径驻点热流理论预测与测量数据的比较

实线为公式(6)计算值

$$q_{w0}=0.763Pr^{-0.6}\times\left\{(\rho u)_w^{0.1}(\rho u)_0^{0.4}\left[1+\left(L_e^{0.52}-1\right)\frac{h_D}{h_0}\right](h_0-h_w)\sqrt{\left(\frac{\mathrm{d}u_e}{\mathrm{d}x}\right)_0}\right\}, \tag{6}$$

其中, $\left(\frac{\mathrm{d}u_e}{\mathrm{d}x}\right)_0=\frac{1}{R_0}\sqrt{\frac{2(P_0-P_\infty)}{\rho_0}}$, ρ为密度, P 为压力, h 为焓, R_0 为驻点曲率半径, Pr=0.71 为普朗特数, L_e=1.4 为路易斯数, h_D 为气体离解焓. 下标"w"表示壁面, "0"表示驻点, "∞"表示来流. 将试验结果与公式(6)计算值进行比较(图 8). 图 8 表明在本试验条件下, 试验数据平均值与公式(6)计算值的偏差小于 7%.

上述试验测量误差是由传感器、风洞流场、测控系统等多种因素引起的. 整体式热电偶产生误差的主要原因是: (1) 镍铬和康铜都是合金, 成分的差异引起分度值的误差; (2) 绝缘层对接点层温度的影响, 产生误差; (3) 部分传感器接点层质量较差, 类似虚接等.

5 结论

本文以双组元电子束物理气相沉积的方法制备康铜薄膜热接点的整体式热电偶测热传感器, 感应元件的尺寸最小可至直径 0.1 mm, 空间分辨率较传统测热传感器提高了一个数量级, 可用于测量 R0.5 mm 的球锥驻点热流. 整体式热电偶测热传感器频响可达 100 kHz, 完全可以满足试验时间仅为毫秒量级的激波风洞.

整体式热电偶的测量精度较高, 7 次测量结果与平均值散差小于 10%. 这样的测试精度明显优于传统的柱状铂薄膜电阻温度计. 主要原因有 3 个方面: (1) 整体式热电偶采用的基底材料为金属, 质地均匀, 明显优于玻璃基底材料; (2) 整体式热电偶抗冲刷性较强, 两极只要连接即可, 与接点的大小无关; 并且金属膜与金属基底的结合力远好于铂膜镀在玻璃基底上; (3) 整体式热电偶的最大优点就是最大限度的保证模型表面外形不变, 其小至直径 0.1 mm 的接点对外形的影响微乎其微.

但是热电偶的灵敏度很低, 测量低热流时, 信噪比差. 因此, 整体式热电偶更适宜于测量高热流, 例如小半径的球头驻点热流, 再附区的表面热流等. 此外, 在试验中个别传感器的康铜膜未经受住气流冲刷而剥落, 可能与镀膜前传感器表面缺陷有关.

致谢 感谢中国科学院力学研究所樊菁研究员的讨论与帮助.

参考文献

1 Nakakita K, Osafune T, Asai K. Global heat transfer measurement in a hypersonic shock tunnel using temperature-sensitive. AIAA-2003-0743

2 Hubner J, Carroll B, Schanze K, et al. Temperature and pressure sensitive paint measurements in short duration hypersonic flow. AIAA-99-0388

3 Oliver H. Thin-film gauges and coaxial theromocouples for measuring transient temperatures. (Description-gauges2.pdf, from http://www.swl.rwth-aachen.de)

4 Holden M S. A database of aerothermal measurements in hypersonic flow in building block experiments for CFD validation. AIAA-2003-1137

5 张仕忠, 陈宏, 董志成, 等. 高焓激波管驻点热流率测量. 第十四届全国激波与激波管学术会议论文集, 2010. 387–390

6 陈星, 宫检, 师军, 等. 尖前缘驻点热流测量试验研究. 第十五届全国激波与激波管学术会议论文集, 2012. 440–446

7 Schultz D L, Jones T V. Heat-transfer measurements in short-duration hypersonic facilities. AGARD-AG-165, 1973

8 Li S H, Shu Y H, Fan J. Thickness and component distribution of yttrium-titanium alloy films in electron beam physical vapor deposition. Sci China Ser E Tech Sci, 2008, 51: 1470–1482

9 樊菁, 舒勇华, 刘宏立. 多元电子束物理沉积系统的研制. 中国科学院力学研究所科技报告, IMCAS STR 2005001, 2005

10 Fay J A, Riddell F R. Theory of stagnation point heat transfer in dissociated air. J Aeronaut Sci, 1958, 25: 73–85

·科学新闻·

中国未来海洋联盟成立

由中国科学院学部主办, 中国科学院学部学术与出版工作委员会承办, 厦门大学、山东大学、《中国科学》杂志社协办的第 39 次中国科学院学部科学与技术前沿论坛暨海洋科技发展战略研讨会于 2014 年 8 月 10~11 日在青岛召开.

21 世纪是海洋的世纪, 海洋在气候变化和全球碳循环过程中发挥着至关重要的作用. 本次海洋科技战略发展研讨会发出了组建中国未来海洋联盟的倡议, 得到了与会专家的热烈响应. 大家认为, 在目前海洋研究的形势下, 海洋研究跨学科交叉还不足, 面对重大科学问题时, 科研力量还较分散. 为了我国未来海洋科学的发展, 尽快缩短与世界海洋强国的差距, 非常迫切需要组织一个可以汇聚各方面优势资源, 整合各方面优势力量, 协同各方面优势人才的学术组织.

8月11日上午, 中国科学院学部工作局刘春杰主持了中国未来海洋联盟的揭牌仪式, 汪品先、苏纪兰、胡敦欣、潘德炉、穆穆、王铁冠、焦念志、孟伟、张偲等 9 位院士和王麒龙、陈镜明、Edward Laws、孙松、陈大可、骆永明、戴民汉、乔方利、王凡、王东晓等 10 位教授以及中国科学院学部及国家海洋局等有关部门的与会领导共同为中国未来海洋联盟揭牌. 11 日下午, 中国海洋与湖沼学会理事长孙松研究员主持了中国未来海洋联盟的成立大会, 大会选举产生了第一届中国未来海洋联盟理事、常务理事、推举焦念志院士为联盟理事长, 并推举产生了由杜祥琬、胡敦欣、吕达仁、潘德炉、苏纪兰、唐启升、汪品先、王铁冠、徐冠华、殷鸿福、朱日祥等 11 位院士组成的海洋联盟顾问委员会和包括来自欧美印7个国家的11位国际知名专家作为国际顾问委员会. 焦念志理事长在成立大会上发表了讲话, 明确了中国未来海洋联盟以“交叉融合 协同创新 资源共享 面向未来”为宗旨, 努力促进学科交叉, 合力助推中国海洋研究迈入新阶段, 向政府部门提供科技咨询服务, 努力提升我国在国际学术界的地位, 为把我国建设成国际海洋强国而努力.

中国未来海洋联盟成立后立即启动的第一项重要工作是撰写“中国蓝碳计划”报告, “中国蓝碳计划”将为我国海洋碳汇以及相关的环境与气候研究起到规划和指导作用. 据了解, 2009 年联合国环境署、粮农组织和教科文组织政府间海洋学委会发布“蓝碳: 健康海洋对碳的固定作用——快速反应评估”报告, 报告指出世界上每年通过光合作用捕获的碳, 即“绿碳”中, 有 55%是由海洋生物捕获的, 这其中由海洋生态系统捕获的碳即被称为“蓝碳”. 随着近年来人们对海洋认识的深化, 蓝碳概念无论是内涵还是外延都发生了重大变化: 由近海到大洋, 由表层到深层, 由宏体生物到微型生物; 同时, 古今结合、学科交叉、协同创新、科学与技术融合, 也成为蓝碳研究所必需. 基于此, 论坛经过研讨认为, 有必要对海洋碳循环的各个方面进行一个较为全面地梳理并对我国蓝碳研究进行总结和制定未来规划.

(本刊记者 王元火)