

再入体激波层和近尾流热 辐射实验研究

葛学真 王九瑞 张正信

(中国科学院力学研究所)

文摘 本文介绍了在弹道靶设备上对再入速度下模型的热辐射进行的实验研究工作。铝、高硅氧和聚碳酸酯三种材料的模型在速度为4.5~6.0(km/s), 压力为600—8000Pa条件下做了实验, 在258nm—1100nm光谱范围内完成了九个波段的辐射测量, 给出了三种材料模型的辐射光谱分布曲线。结果表明辐射量除了受环境条件影响外, 还强烈地依赖于模型材料; 由烧蚀产物引起的辐射通量主要在可见光和近红外区(465nm以上)。估算了烧蚀产物引起的辐射加热率, 对头部和近尾流辐射通量做了比较。

主题词 再入模拟、再入加热、辐射测量、自由飞试验、弹道靶、再入物理

一、概 述

高超音速飞行体再入大气层时, 头部激波层温度很高, 达6000K以上, 使气体中的分子和原子发生离解、电离、复合以及分子振动等复杂的物理化学过程, 飞行体周围的灼热气流使物体温度急剧上升而发生烧蚀现象, 这些使得高超音速再入现象极其复杂。随着航天事业的发展, 从60年代起就开展了这一课题的研究, 70年代以来美国利用高空测量飞机从航天飞机轨道下面直接测量再入时的红外特性, 我国也进行过实弹观测, 但是机会太少价钱昂贵, 因此系统地进行地面模拟实验研究是十分必要的。有助于深入认识再入物理现象, 预计流场模式和估价材料性能。

弹道靶是研究再入物理现象最有用的设备, 这是因为弹道靶模型的自由飞实验可以在类似真实流场的条件下进行, 没有干扰。我们自1985年以来在弹道靶中采用多路辐射计方法测量了各种条件下激波层和近尾流光谱辐射, 并对结果进行了初步分析。

二、实验设备和测试仪器

模型发射器为二级轻气炮, 口径13mm, 发射速度范围为4.5km/s—6.0km/s, 实验段

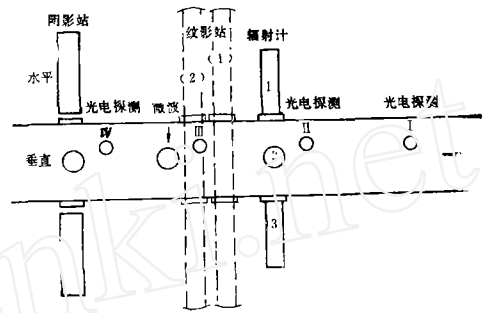
本文1986年8月11日收到。

环境压力根据要求控制在 600Pa—3000Pa，相应密度比为 $\rho_\infty/\rho_0=0.02-0.1$ ，模拟高度约 20—30km。辐射计距炮口 6m。模型有 $\phi 13\text{mm}$ 圆柱， $\phi 10\text{mm}$ 球和半锥角为 10° 的钝头锥。模型材料有铝、高硅氧和聚碳酸酯。

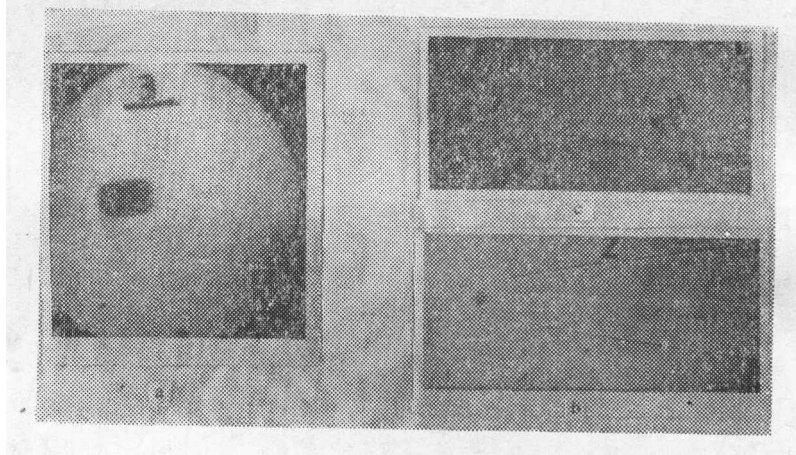
测试系统布局示于图一，三个辐射计安装在实验段的同一个截面上，轴线垂直于模型飞行路径。光电探测器用于测量模型速度并给辐射信号记录仪器提供外同步信号，同时触发火花光源，由阴影仪和纹影仪进行姿态照相，模型姿态照片示于图二。

辐射计^[1]是双狭缝式，两狭缝间距 426mm，狭缝宽度 5mm，结构示意图见图三。辐射计的转换器件是光电倍增管，配上不同的单色滤光器作光谱元件，数据见表 1。

辐射计的电路由光电倍增管电路和信号处理电路组成。倍增管电路应保证打拿极电压分

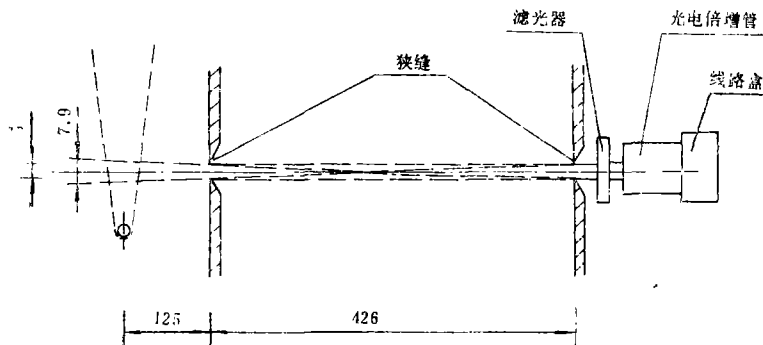


图一 测试系统布局



图二 模型姿态照片

- a. 聚碳酸酯圆柱 5.5k m/s
- b. 高硅氧球 5.26k m/s
- c. 铝 10° 钝头锥 4.64k m/s



图三 辐射计狭缝安装示意图

布合理，动态过程中电压稳定，信号处理电路要有足够的带宽，响应时间小于 $1\mu\text{s}$ 。光电倍增管对辐射的响应以电压信号输入瞬态记录仪，作模-数变换，以数字量存贮下来，实验结束后再经过数-模变换，输出电压信号，示波器显示，照相记录。也可以输入计算机。

表 1 辐射计的光谱元件及相应的转换器件数据表

最大灵敏度波长 (nm)	半宽度(mm)	管 型	阴极光谱类型
258	7.6	GDB-126	S-5
319	4	GDB-126	S-5
365	7	CDB-126	S-5
465	7	GDB-235	S-11
510	11	GDB-235	S-11
557	9.5	GDB-235	S-11
762	11	GDB-238	S-1
974	12	GDB-238	S-1
1100	10	GDB-238	S-1

三、标 定 方 法

辐射计作为一个转换器件，把从实验目标来的入射流跟从一个已知辐射强度的标准源来的入射流相比较得到对实验源的定量测定。实验和标定在相同的几何尺寸和相等的光程下进行。

辐射计对实验目标源的响应为：

$$V_0 = K \Omega_0 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) T(\lambda) J(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

式中 V_0 为辐射计输出 (V)； K 为仪器系数； Ω_0 为辐射计对目标源所张立体角 (S_r)； $T(\lambda)$ 为滤光器的光谱灵敏度； $J(\lambda)$ 为目标源光谱辐射强度 ($\text{W}/\mu\text{m}, S_r$)； $R(\lambda)$ 为光电倍增管光谱响应； $\Delta\lambda$ 为滤光器半宽度 (μm)。

辐射计对标准源的响应为：

$$V_r = K' \Omega_r \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) T(\lambda) N(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

式中 V_r 为辐射计对标准源的响应输出 (V)； Ω_r 为辐射计对标准源所张立体角 (S_r)； $N(\lambda)$ 为标准源光谱辐射强度 ($\text{W}/\mu\text{m}, S_r$)。由于几何尺寸相同，有 $\Omega_0 = \Omega_r$ ，在确定的光谱范围 $\Delta\lambda$ 内，从简化的响应方程 (1) 和 (2) 得到

$$J_\lambda = \frac{K'}{K} \cdot \frac{N_\lambda V_0}{V_r} \quad (3)$$

标准钨带灯鉴定书给出了辐射亮度 $B_\lambda, \text{W}/\text{cm}^2 \mu\text{m}$ ，标准源可近似看成余弦辐射体，则

$$N_\lambda = \frac{AB_\lambda}{\pi} \quad (A \text{ 为标准源有效发光面积})$$

代入 (3) 式， $J_\lambda = \frac{K' V_0 A}{K V_r \pi} B_\lambda$ ，令 $k = \frac{K'}{K}$

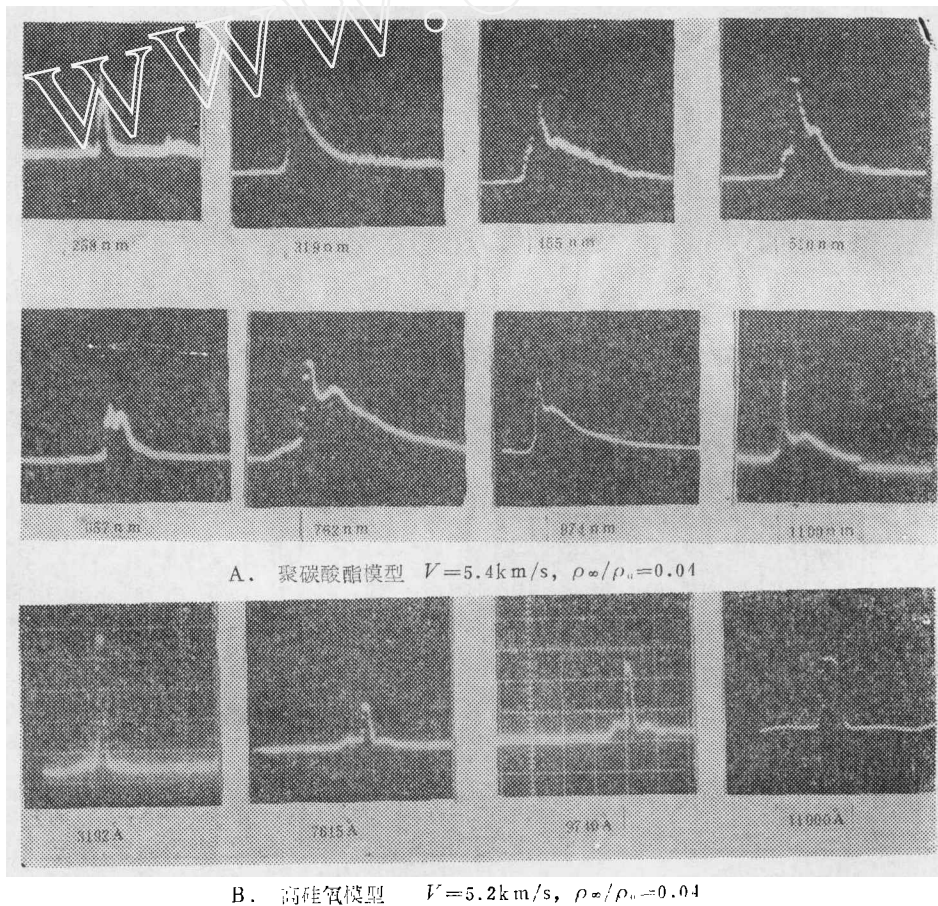
从而目标源的辐射通量可表达为

$$W_{\lambda} = 4\pi J_{\lambda} = \frac{4AkV_0 B_{\lambda}}{V_r} \quad (4)$$

钨带灯鉴定书给出的光谱响应下限为 400nm, 根据^[1]给出的钨带灯光谱曲线(下限为 300nm)做了外推, 得到319nm 和 365nm的数据。

四、实验结果

一组典型的辐射计输出的示波器记录示于图四,



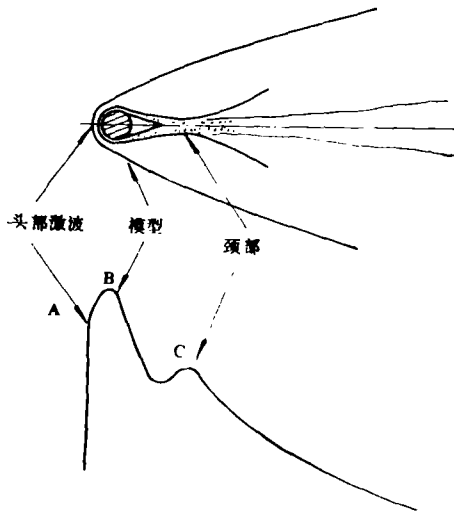
图四 辐射输出的示波器记录

从图四A组照片可以看出, 在波长较短的 258nm, 319nm, 辐射信号是一个单一脉冲, 在可见光和近红外波段, 形成明显的次峰, 在465nm 和 510nm, 次峰约为主峰的 0.5 倍, 在 657nm 和 752nm, 次峰最强, 约为主峰的 0.8 倍, 在 974nm 和 1100nm, 次峰又下降。高硅氧模型的辐射输出没有次峰。把波形的时间坐标与模型及其流场先后进入辐射计视场的尺度对照起来可以看出波形与模型各部分的关系, 以一个聚碳酸酯球为例, 对应关系示于图五。波形

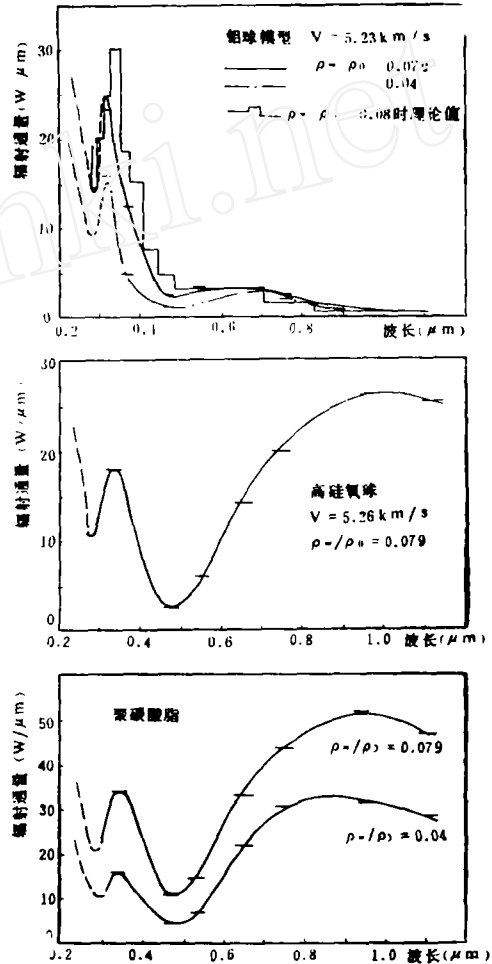
中的主峰A对应于气体帽部分，主峰的上升部分B是模型侧面进入视场时引起的辐射通量的增加，此后辐射量衰减，波形开始下降，在距主峰4μs左右的C处，即气体帽后约20mm处，出现第二次上升，这说明在颈部出现了辐射量的增强，但只在可见光和近红外区出现。

1. 激波层辐射通量的光谱分布

激波层辐射数据是从示波器记录的第一个峰值读取的。对三种材料的球模型分别在九个波段上取数据，得到了激波层辐射通量的光谱分布，示于图六。这是4π立体角内的辐射通量的光谱分布曲线。图中的横短线表示辐射计谱线半宽度。



图五 辐射计输出与模型各部分发光的对照关系



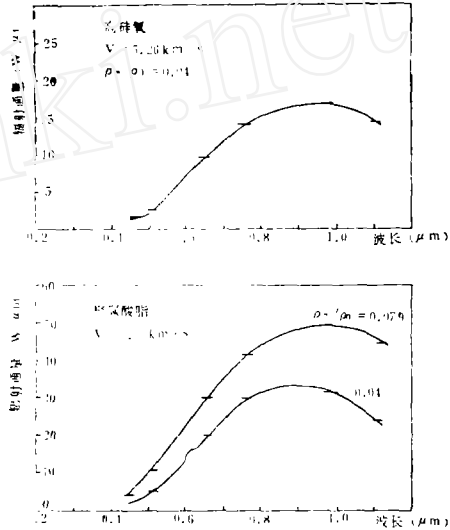
图六 三种材料模型的辐射通量的光谱分布曲线

关于高温气体辐射，Kivel和Bailey早在1957年就发表了“高温气体辐射表”，Meyerott发表了“空气的吸收系数”，这些文献成了后来研究热力学和化学平衡条件下高温气体辐射予计的依据。本文收入了按Meyerott理论得出的平衡空气光谱辐射曲线^[3]与图六中铝模型的辐射谱线相比较，可见本实验结果与理论值在密度比较高时是相符的，但在密度比为0.04时与理论值的差异较大，（未画出理论曲线）这是由于在低密度下原子复合速率低，气体分子离解时所吸收的能量不能全部释放，因而使高温气体处于非平衡状态。在非平衡状态还没有很完善的理论预计，在下面的分析中采用了近似方法，根据对铝模型表面温度的计算，在它通过辐射计视场时不会达到熔化温度，没有烧蚀产物生成，所以可把铝模型的辐射谱线作为在平衡条件和非平衡条件下空气辐射的谱线^[4]。从这一方法出发，把高硅氧和聚碳酸酯模型的辐射谱线与铝模型的谱线相比较，可以看出，靠近紫外部分，它们的辐射通量差别较小，约在15%以内，认为这一段辐射谱线与空气辐射谱线相同，从465nm直到近红外

(1100nm) 部分, 辐射量超出了铝的辐射量, 聚碳酸酯的超量尤其大。这可能是由热的烧蚀表面引起或由烧蚀产物进入边界层引起, 实验证明是后一种。用圆柱模型和带钝头的圆柱模型做实验, 如果超量辐射由热表面引起, 则钝头圆柱的辐射量应大于圆柱体的辐射量, 因为辐射计从侧面“看”到钝头圆柱体的面积较大, 而圆柱体头部的侧面积等于零。但实际上两种模型的辐射量在相同条件下几乎是一样的, 因而可以说超出空气辐射的部分是由烧蚀产物进入了边界层引起的。

2. 烧蚀对辐射的影响

如上所述, 高速模型及其周围气体的辐射受到烧蚀产物的影响, 烧蚀对二种材料辐射的影响示于图七, 其数据是从烧蚀模型辐射通量中减去铝模型辐射通量 (即空气辐射) 得到的, 做这种处理时由于速度的差异, 按辐射通量与速度的 8 次幂成正比的关系进行调整^[6], 调整量在 20% 以内。图七表明, 对聚碳酸酯材料来说, 烧蚀产物的总辐射通量远超过了空气而成为激波层辐射的主要来源; 还可以看出烧蚀产物辐射的光谱主要在 465nm—1100nm, 这跟烧蚀产物的成份和辐射机理有关。将辐射通量从 465nm 到 1100nm 积分再除以辐射计所观察到的模型表面积, 得到烧蚀产物引起的总加热率 q_0 , 表 2 给出了从两种材料的模型得到的数据。



图七 二种材料的模型烧蚀产物辐射的光谱分布

表 2 两种材料模型的速度、密度比和加热率数据表

模型材料	速度(km/s)	环境密度比	加热率 (W/μm cm ²)	数据来源
高硅氧	5.16	0.04	13	本实验
聚碳酸酯	5.06	0.04	16.25	
聚碳酸酯	5.10	0.1	26.5	
聚碳酸酯	5.75	0.08	37	文献[3]
聚碳酸酯	5.9	0.02	14.7~17.5	
聚碳酸酯	6.08	0.08	69	

3. 气体帽辐射和尾流辐射的比较

测定再入体辐射特性在定位和跟踪方面都很重要, 但从远距离观察, 由于受分辨率的限制分别观察气体帽和尾流区的特性是比较困难的, 因此了解这两个区域辐射能量的相对关系是很有用的。尾流的总辐射通量和气体帽辐射量分别表达为:

$$P_w = \int_{x_1}^{x_2} E(x) dx \quad (5)$$

$$P_g = \int_R^{R+\delta} E(r) dr \quad (6)$$

式中 $E(x)$ 为单位尾流长度上的辐射通量, R 为模型头部曲率半径, δ 为激波层与模型间距

离。由实验结果估算,两种材料的模型在50倍直径以内的尾流与气体帽辐射的比率 P_w/P_g ,分别为:聚碳酸酯,140;高硅氧,10。由此得到的结论是,虽然气体帽辐射在各个波段都是最强的,但从积分效果看,尾流辐射的总能量远超过气体帽辐射的总能量,这一点与文献[5]的结果是一致的;由于烧蚀的影响,比率 P_w/P_g 跟材料有很大关系;另外密度增大时,即高度降低时,比率 P_w/P_g 呈现下降趋势。

五、结 论

实验结果与有关的理论预计基本一致,与国外发表的一些实验结果相类似,说明实验是成功的,测试数据是可信的。

实验结果表明,激波层辐射不仅依赖于环境条件,还强烈地依赖于材料。采用非烧蚀模型和烧蚀模型辐射量相比较来确定烧蚀产物辐射量的分析方法证明了,低温烧蚀材料的烧蚀产物辐射是激波层和近尾流辐射的主要来源,其光谱分布主要在可见光和近红外区。对于辐射的轴向分布,实验结果表明,头部辐射最强,而尾流区总辐射能量远超过头部,在所实验的材料中以聚碳酸酯的辐射最强。

此项工作在吴承康教授指导下完成,参加实验工作的还有汪锡琦,贾玉芳,韩忠,张振松,王岫云和赵秀兰等同志,本工作曾得到王鹿受等同志的支持和帮助,作者在此对他们表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] 葛学真等:《气动实验测控技术》,1985.1.
- [2] 史斯伍镇译:《光电学手册》,RCA公司。
- [3] Page, William A. and Arnold, James O.: NASA TR-R-193.
- [4] William, Roger A. and Davey, William C.: NASA TND-1978.
- [5] 赵国英:《力学学报》,第17卷,第2期,1985.
- [6] Stephenson, Jack D.: NASA TND-2760.

EXPERIMENTAL STUDIES OF THERMAL RADIATION OF SHOCKLAYER AND NEAR WAKE OF BODIES AT REENTRY VELOCITY

Ge Xuezen Wang Jiurui Zhang Zhengxin

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences)

ABSTRACT The radiative properties of shock-layer and near wake of the models of blunt bodies flying in ballistic range were studied. The materials of models investigated included aluminium, glass-cloth/polyester, and polycarbonate. The measurement of radiation has been made in spectral range from 258 nm to 1100nm at the velocity range from 4.5 to 6.0km/s. The spectrographic data of shock-layer and near wake regions were obtained for models of aforementioned three materials. The results basically coincide with the theoretical

prediction. It was also indicated that the radiation strongly depends on material as well as on velocity and density. The spectral range of the radiation caused by ablating products was mainly in near infrared. The radiant heating rate of ablation products was also evaluated. **SUBJECT TERMS** Reentry simulation, Reentry heating, Radiation measurement, Free flight test, Ballistic range, Reentry physics.

2000年惯性技术展望研讨会在临潼召开

中国宇航学会飞行器惯性器件专业委员会于一九八七年十一月十八日至十一月二十三日在陕西省临潼县召开了“二〇〇〇年惯性技术展望”研讨会。参加会议的有国防科工委、航天工业部、航空工业部、中国船舶工业总公司、中国科学院、石油部、交通部、电子工业部、冶金部及中国人民解放军空军的所属单位和有关高等院校等30多个单位50多位代表。会议收到论文25篇，在大会进行学术交流的论文共17篇，其余论文则分别在小组会上发言或书面交流。论文内容主要涉及到以下几个方面：

- 一、惯性导航系统及组合导航系统的发展展望；
- 二、新仪表新技术的发展现状及发展趋势；
- 三、现有仪表的改进设计与民用开发现状，新材料的现状与发展趋势。

清华大学章燕申教授在会上作了国外激光陀螺研制情况的专题报告。

大会分两个小组进行了热烈的讨论，与会代表一致认为学到和了解到许多有益的技术，开阔了眼界，对今后选择科研工作的方向有一定帮助。这次学术会议还与应用结合在一起，加强了研制单位、生产单位和使用部门的联系，为惯性技术用于国民经济，开发民品提供了广阔的天地。值得高兴的是本次会议年轻人大幅度增加，占会议代表人数的五分之二，显示出惯性技术的新生力量正在成长壮大。

在会议期间，委员会召开了全体委员会议，对委员会的工作和这次会议筹备的情况，向全体委员作了汇报，与会委员讨论并安排了今后两年的学术活动。

徐珍报导