

国际等离子体科学与技术会议 (ICPST)

唐福林 (中国科学院力学研究所)

1986年6月由中国力学学会和北京等离子体学会共同举办在北京召开了国际等离子体科学与技术会议。这次会议得到来自比利时、加拿大、捷克斯洛伐克、意大利、芬兰、法国、联邦德国、民主德国、匈牙利、日本、荷兰、波兰、罗马尼亚、瑞士、土耳其、英国、美国、苏联和中国等十九个国家的学者的热情支持,因此会议具有广泛的代表性。各国著名科学家,如美国明尼苏达大学教授、《等离子体科学》杂志主编 E. Pfender, 苏联科学院通讯院士、新西伯利亚分院热物理研究所副所长, M. F. Zhukov, 中国科学院学部委员谈镐生等组成了会议的学术指导委员会,对会议进行具体指导。由来稿中选出的117篇论文汇编而成的论文集,内容十分丰富,不仅包括理论分析、实验研究,还有物理模型、实验装置、诊断以及各类重要应用。这些都充分说明低温等离子体科学与技术近年来在许多国家的迅速发展。目前,低温等离子体科学与技术工业、科学研究,甚至在医学实践中都得到了广泛应用。

大会由中国科学院力学研究所副所长、会议副主席、秘书长吴承康教授作了题为“中国等离子体技术研究”的报告,向各国学者介绍了低温等离子体技术在中国的发展及目前状况,在综述报告方面还有美国 E. Pfender 教授作的“热等离子体流中对颗粒的热流”,苏联 M. F. Zhukov 教授的“电弧等离子体产生的物理背景”以及中国清华大学过增元教授的“电弧、气流与磁场的相互作用”;在专题综述方面有联邦德国 H. D. Steffens 教授的关于等离子体喷涂的现状与发展,瑞士 F. Pinnekamp 教授关于如何利用电弧物理性质以较合理地设计断路器以及荷兰 J. Kistemaker 教授的关于气体放电基础背景。所有这些报告不仅概观了相应的等离子体科学与技术的现状,并着重指出等离子体物理性质以及等离子体与颗粒、电弧、气体、磁场之间相互作用的机制在等离子体科学与技术发展中所占的重要地位。

在会议上发表的学术论文主要可分成准平衡热等离子体与低气压非平衡等离子体两大类,分别在四个会场进行。由文章篇幅来看,两大类相差不多,而等离子体的刻蚀及沉积和聚合及物质表面改性又占了低气压非平衡等离子体学术论文中的绝大部分。这一现象充分说明了等离子体科学与技术在这些领域中的优势,也体现了当今等离子体科学与技术发展的趋势。

发表的准平衡热等离子体实验研究报告中有不少

涉及冶炼和化学冶金工作。高纯度超细粉末具有优异的力学、光学等物理性能,在半导体、机械加工以及众多的国民经济领域中有着大量应用,而等离子体又具有温度高、气氛可控等特点,因此应用等离子体技术来制备超细粉末是近年来国际、国内一个活跃领域,特别在我国,由于钛、钨等难熔金属的资源十分丰富,因此应用等离子体来制备超细粉末的技术一直受到我国科学工作者的重视。这样的等离子体可以是直流放电产生的,也可是高频感应的。如清华大学用氢等离子体射流还原氧化钨以制取平均尺寸为 $0.06\ \mu\text{m}$ 的高纯度的钨粉,这种技术不仅无污染,成本低,还具有投资少的优点。中国科学院成都有机化学研究所利用四氯化钛和甲烷在等离子体中进行反应获得了碳化钛超细粉末,并研究了甲烷引射位置与产品中钛含量的关系。中国成都科技大学利用无线电频率氮等离子体射流制取了氮化钛超细粉末,研究了氢 (H_2): 氨 (NH_3): 四氯化钛 (TiCl_4) 的最佳摩尔比以及氨 (NH_3) 入口位置对氮化钛形成的影响。这些都受到与会学者的关注。

粉末冶金具有机械强度高,复杂零件加工简单等优点。粉末冶金中使用的颗粒直径大约在几十个微米左右。等离子体技术在此领域也大有用武之地。波兰华沙技术大学利用等离子体煅烧氢氧化铝 ($\text{Al}(\text{OH})_3$) 制取直径为 $30\text{--}70\ \mu\text{m}$, 高纯度的 α 相的氧化铝 (Al_2O_3) 就是一例。由于利用了等离子体技术使氧化铝 (Al_2O_3) 颗粒中的碱金属含量大大减少。

利用等离子体进行黑色金属冶炼一直是等离子体科技工作者梦寐以求的追求之一,经过多年的不懈努力,现已达到可对三相交流或直流等离子体冶炼进行工业经济指标比较的阶段。加拿大国家基金委员会 W. G. Brown 教授在“交流等离子体反应器的基本理论和经济性”一文中对此进行了详细的论证,在文中 Brown 教授不仅介绍了加拿大多伦多大学、加拿大荷兰集团、安大略研究基金会在三相交流长弧等离子体闪烁反应器 (EAFR-Extended Arc Flash Reactor) 的工作,还概述了 Krupp 型等离子炬熔炉工作的发展。根据现有的工作数据, Brown 教授认为当熔炉的容量大于3吨时, Krupp 型交流等离子炬熔炉的经济性要明显地优于 EAFR。其它如中国科学院力学研究所利用三相交流等离子体发生器进行铝铁冶炼的实验研究,北京钢铁研究院利用直流等离子体进行铬铁冶

炼的实验研究都给出了令人感兴趣的实验结果和数据。

除上述外,在等离子体喷涂方面也发表不少有价值的工作。等离子体喷涂技术的发展,相对来说开始得比较早,但七十年代中期以来,由于真空等离子体喷涂技术的出现,使此项技术又增加了新的活力。瑞士等离子体技术经理处(Plasma-Technik AG)的H. Eschnauer教授关于大气压和真空等离子体喷涂(APS和VPS)的报告详细介绍了利用机器人进行氧化锆(ZrO_2),氧化钙(CaO),氧化镁(MgO),氧化钇·氧化钆($ZrO_2 \cdot Y_2O_3$)等的喷涂以控制涂层厚度、温度,提高涂层质量的情况。联邦德国科学院F. Lugscheider教授关于在 10^{-7} 毫巴气压下喷涂钛的报告,介绍了由此获得的含氧量低,致密性好,机械强度高,抗腐蚀性好的涂层。中国科学院金属研究所也介绍了功率为80 kW的真空喷枪的结构和使用,用此喷枪得到的钨、镍钴铬铝钇(NiCoCrAlY)等涂层的电镜扫描相片表明真空喷涂的涂层结构比大气压下的要大大致密,气孔也明显减少,碳化钨/钴(WC/Co)的金相细微相片还表明,在大气压下进行喷涂时碳的损失达32—40%,但在真空喷涂时,碳损失少于5%。这些都无可辩驳地表明了真空等离子体喷涂的优越性。

探讨热等离子体基础过程和物理模型的大部份理论工作是与上述各类实验研究有关的。如苏联科学院新西伯利亚分院热物理研究所的关于熔融颗粒与表面相互作用的若干热物理与流体力学特性的研究、高温气流中包层粒子性能的数值模拟,清华大学关于在等离子体中颗粒传热表达式的适用性,加拿大McGill大学关于转移弧等离子体反应器中粒子自由飞行区间的模型等都反应了等离子体应用在这些技术领域的深入开展。

正如大会综述报告中指出的,等离子体物理性质在等离子体科学与技术发展中占有重要地位。相当篇幅的理论研究文章涉及了如何计算等离子体物理性质这一复杂而又重要的课题。苏联莫斯科包曼高工关于化学平衡成分及相的数值计算和低温等离子体热力学,四川气动中心提出的单一双原子气体热力学局域平衡等离子体性质的计算方法,以及用这些计算方法获得的结果与实测的比较,都有一定的实际应用意义。

等离子体诊断一直是公认的发展等离子体科学与技术的关键之一。日本Tokai大学和物理化学研究所共同进行了高密度等离子体氮离子谱线红移的研究,他们在发表的论文中指出当电子密度 $N_e = 3.6 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$,电子温度 $T_e = 2.0 \times 10^4 \text{K}$ 时,氮II谱线 $\lambda 4686 \text{\AA}$ 的红移为 $0.13 \pm 0.03 \text{\AA}$ 。这里的 N_e 和 T_e 都比过去研究的为高,从而为高密度低温等离子体的诊断提供了可能。

有关低气压非平衡等离子体的论文主要集中在聚

合及表面处理和刻蚀及沉积两方面。在等离子体气氛中进行刻蚀及沉积是近十年来等离子体科学与技术应用的一个新兴领域,由于等离子体的纯度高,含有高能的活泼粒子,因此用等离子体来进行刻蚀及沉积远比传统的方法要优越。目前,这一技术在材料、机械加工、半导体等工业领域中都得到高度的重视,有的已在生产中得到应用。这一趋势在国内外都是一致的,但由会议上发表文章的数量来看,国外学者在这方面的论文数量,不论是在建立物理模型,进行理论分析,还是在实验研究方面都超过我国。美国、联邦德国等的学者都在会上报告了他们的实验研究和装置结构。如美国IBM公司报告了用氢化硅(SiH_4)浓度小于2%的等离子体进行等离子体强化化学气相沉积以获取微电子工业所需的氮化硅膜的研究。用这种方法获得的膜与高浓度或100%氢化硅(SiH_4)时的相比,不仅致密性好,热稳定性高,且氢含量少,是一个良好的绝缘体。与此同时氢化硅浓度<2%的等离子体不像氢化硅浓度高时可瞬时点燃,因此这一方法更为安全,更适用推动此项技术在微电子工业中的应用。联邦德国Leybold-Heraeus GmbH报告了改进型平面磁控阴极的设计思想和结构,这种改进的阴极能更有效地利用靶材,并减少靶材的污染,提高溅射的速率,改变了过去磁控溅射涂层速率低的状况。此外,像波兰、捷克、罗马尼亚等许多国家也报告了令人感兴趣的实验结果。如捷克科学院物理研究所关于用直流等离子体进行钛的氮化物的气相沉积,波兰材料科学及金属工艺学院在高频甲烷等离子体中进行石墨沉积和刻蚀的工作。除实验研究外,这些国家的学者还进行了不少建立物理模型、进行理论分析的研究工作。如日本和加拿大合作者合作的关于氩-氮($Ar-NH_3$)混合气体等离子体正柱的理论分析。该文应用带电粒子的输运方程,在等离子体准中性和双极扩散的假定下,计算了各类粒子的数密度、电场分布及电子温度。计算所得的电场分布及电子温度与实测结果定性一致,其数值上的符合程度达50%。由计算结果还可看到各类粒子的数密度与正柱的总压、等离子体密度和氨(NH_3)的分压有密切关系,并表明基于由电子碰撞而产生电离的经典等离子体化学反应模型需重新加以考虑。此外像另一些日本和加拿大合作者在氩-氢化硅($Ar-SiH_4$)和氦-氢化硅($He-SiH_4$)微波放电等离子体下游的等离子体参数计算,以及更为基础研究的,罗马尼亚学者的关于磁场在电双层捕获过程中的作用等也都引起与会学者的关注。我国开展这方面工作的单位也很多,参加会议的学者也发表了有关的科学论文,如大连工学院的磁控溅射离子涂层的结构和金相分析以及等离子体场的研究。但相形之下,在深度及机理性工作方面显得不够,值得引起重视。

相反,在聚合及表面处理方面,我国科学工作者向

会议提交的论文数量比外国学者提交的多很多。如上海纺织研究所的对聚乙烯对苯二酸盐在氧、氮和空气辉光放电低温非平衡等离子体中的改性实验,结果表明经处理后的纤维的湿润性及吸附性都有很大改善。福建海洋研究所和厦门大学合作进行的,应用等离子体聚合方法进行半导体光电极保护膜的控制及其机理研究,中国科学院长春应用化学研究所的用等离子体聚合乙烯,丙烷的机理研究,中国科学院成都有机化学研究所的六甲基乙硅烷的结构及用等离子体进行聚合,都对等离子体聚合提出了新的设想。国外,如罗马尼亚辐射器物理及工艺研究的低电压,热电极电弧的新假设,罗马尼亚化纤研究中心的聚合物表面聚合力的等离子体改性考虑,也引起与会科学家的兴趣。

参加会议的国内外学者一致认为会议交流的内容反映了当前国际上等离子体科学与技术发展的主要趋势,学术水平也是国际性的。对于会议的组织工作国内外学者也是深表满意的。如一名苏联学者由于返苏航班的时间关系,不能参加最后一天的学术讨论,但他又非常希望和中国、法国的同行们交流等离子体手术刀的研究情况,观看中国长海医院使用等离子体手术

刀进行肝脏手术的实况录像,因此要求大会给予安排。虽然会议日程安排得非常紧,播放录像又在会议预定之外,但大会还是设法满足了他的要求,组织了座谈,播放了录像,使这名学者深为感动,再三表示要为推动今后的学术交流作贡献。

历时四天的会议始终在紧张热烈的气氛中进行着,在各分会会场上经常出现因热烈讨论而不能按时结束的局面。在会议休息间歇,在晚上休会期间,可看到不同国籍的科学家们三三两两地在休息厅、在冷饮室交流研究的经验与体会。

在会议结束的宴会上,美国 E. Pfender 教授代表全体出席会议的外国科学家对会议组织者的良好安排和热情表示热烈的谢意,对会议的学术水平给以很高的评价,并希望这样的会议能经常召开。

国际等离子体科学与技术会议结束了,但它在等离子体科学与技术的发展道路上将永远留下它的脚印。这次会议不仅向世界各国展示了中国的科学技术水平,展示了中国人民精湛的组织工作能力,也向世界各国科学家展示了中国人民的热情友好、热爱和平、热爱科学的胸怀。

(上接第50页)

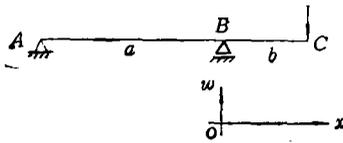


图 4

$$\text{查表知 } \theta_B = -\frac{pba}{3EI} \int_0^b \frac{M(x)}{EI} dx = -\frac{pb^2}{2EI}$$

$$\int_0^b \left[\int_0^x \frac{M(x)}{EI} dx \right] dx = -\frac{pb^3}{3EI}$$

请注意, C 相对于 B 的变形与假设 B 为固定端时 C 的变形相等。

$$\begin{aligned} \text{最后得 } \theta_C &= -\frac{pba}{3EI} - \frac{pb^2}{2EI} \\ &= -\frac{pb(2a+3b)}{6EI} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} w_C &= -\frac{pb^2a}{3EI} - \frac{pb^3}{3EI} \\ &= -\frac{pb^2(a+b)}{3EI} \end{aligned}$$

例 3 直角拐(图 5)由圆形和矩形截面直杆组成,求 C 点挠度。

解 坐标如图则

$$w_C = w_B + \theta_B l + \int_0^l \left[\int_0^x \frac{M(x)}{EI} dx \right] dx$$

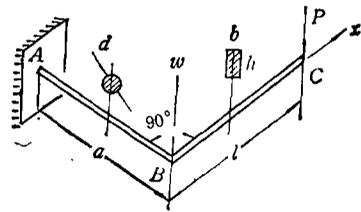


图 5

$$\text{其中 } w_B = -\frac{Pa^3}{3EI}$$

$$\theta_B = \phi_{AB} = \frac{Pla}{GI_P}$$

($I_P = 2I = \pi d^4/32$)积分项反映 C 相对于 B 的变形(可查表)

$$\int_0^l \left[\int_0^x \frac{M(x)}{EI} dx \right] dx = -\frac{Pl^3}{3EI} \quad \left(l' = \frac{b}{12} h^2 \right)$$

故

$$w_C = -\frac{64Pd^3}{3\pi Ed^4} - \frac{32pl^2a}{\pi Gd^4} - \frac{4pl^3}{Ebh^3}$$

由于定积分法把变形分解为几个部份,概念清楚,可分别计算求和,故又称为变形叠加法。把定积分法与载荷叠加法联合运用,解题范围将大为扩展。

参 考 文 献

- [1] 蒋智翔,材料力学,清华大学出版社(1982).