

先进复合材料研究的发展动向

——第五届国际复合材料学术会议概述

沈杏娟

(中国科学院力学研究所)

1985年7月29日至8月1日作者有机会参加了在美国圣地亚哥举行的第五届国际复合材料学术会议(Fifth International Conference on Composite Materials, ICCM—V)。会议有17个国家近六百人参加,是历届国际复合材料学术会议参加人数最多的一次。会上宣谈论文151篇。其中除大会报告一篇外,其它分22个专题在六个分会场报告。这些论文包括复合材料科学6篇,新型复合材料研制与高温聚合物8篇,热塑性复合材料和混合(杂)复合材料各6篇,陶瓷基复合材料11篇,金属基复合材料38篇,复合材料力学性能与破坏41篇,设计方面与分析技术11篇,复合材料的物理性能及环境影响各7篇和复合材料应用10篇。各国参加论文分布为:美国62篇,日本24篇,英国16篇,法国14篇,中国9篇,德国6篇,瑞典及苏联各3篇,加拿大、丹麦、印度、意大利各2篇,比利时及荷兰各1篇,其它4篇。会议内容反映了当前先进复合材料研制、性能、工艺和应用的发展情况。会议举办了展览会,34个单位展出了新型材料、仪器设备和产品应用,会后参观了三个科技单位。

7月29日中国代表参加了国际复合材料学术会议委员会会议,会议除报告了(ICCM—V)的筹备情况和1987年在伦敦举行第六届国际复合材料学术会议(ICCM—VI)的大致方案外,主要讨论了1989年ICCM—VII的举行地点。加拿大、中国、印度和苏联都提出了在本国召开

的提议,经讨论和无记名投票,中国得票最多。当大会主席在宴会上宣布第七届国际复合材料学术会议(ICCM—VII)定于1989年在中国北京举行时,代表们热烈鼓掌。希望我国同行积极准备,以水平高的研究成果在这次大型国际会议上与各国同行交流。

下面以第五届国际复合材料会议上报告的内容为主,结合展览、参观所了解到的发展动向,及时向国内同行介绍于下。

一、新型纤维、基体及其复合材料

在开幕式的大会报告里,一开始就指出了当前被称为是信息时代,不久前说是空间时代,几十年前宣布进入原子时代。我们生活并从事工作在这些时代到另一时代的同一时期里。因此,应该毫不犹豫地说是我们进入另一个时代——复合材料的时代。

确实,近40年材料结构革命的成功使复合材料有了可喜的发展并存在很大的潜力。合成纤维在近40年性能有了稳定的改进,从尼龙开始发展到碳纤维和芳纶纤维,纤维模量增加了100倍,在会上报告的实验室成果将在今后20—30年内,纤维模量还会再提高一个数量级。近40年,纤维强度增加了3倍。近几年碳纤维强度成倍增加,还会再提高50%。模量和韧性都有提高的其它类型芳纶纤维也在研制。如美国Du Pont公司发展的新型芳纶49,强度达

600ksi, 经表面处理改善了纤维和树脂的粘接性, 用于空间容器可提高性能50%, 在潮湿环境下比玻璃纤维具有较好的介电性能。

近40年树脂体系的韧性提高了两个数量级, 在将来的20年会再提高一个数量级。聚合物材料现在跨越相当宽的温度范围(-40°C—+350°C), 从含离子键和赖高聚物的一端到另一端的聚酰亚胺, 从热塑性到热固性。从会议报导, 当前研究注重耐高温的树脂基体, 要求使用温度高于环氧树脂(175°C), 可在200—300°C条件下使用。如加成型聚酰亚胺(PMR)、聚苯并咪唑(PBI)已开始在上工业上试用。PBR固化时不产生小分子, 在加压成型时获得无孔洞和质量高的复合材料。美国E.S.Hsiue报告了用于先进复合材料的新基体体系双腈半互贯网络型高聚物(Dicyanate Semi-IPN)具有热塑性和热固性两者的优点, Kevlar纤维增强SIPN比Kevlar增强环氧具有低的介电常数、低的热膨胀系数和较好的抗热微裂性能, 应用于空间结构材料。石墨纤维增强SIPN在各种环境条件下保持刚度和韧性。由ICI、Phillips和Du Pont公司生产的新的热塑性树脂基体体系, 具有接近金属的韧性, 杜邦公司的H.H.Gibbs介绍了K—聚合物复合材料的工艺和损伤容限性能, K—聚合物是一种新的热塑性聚酰亚胺体系, 碳纤维增强K—聚合物在232°C条件下强度保留率仍很好, 耐腐蚀及损伤容限好, 与芳纶、玻璃纤维复合适用于宇航结构件。日本提出8年规划的目标是纤维增强复合材料强度 $\geq 2.35\text{GPa}$, 耐高温 $\geq 250^\circ\text{C}$, 金属复合材料强度 $\geq 1.47\text{GPa}$, 耐高温 $\geq 450^\circ\text{C}$ 。

混合(杂)复合材料受到注意, 报告有6篇。利用具有高刚度和压缩强度的碳纤维与韧性好的芳纶有机纤维混合, 利用了玻璃纤维的良好冲击性能与便宜的价格。美国Illinois大学的J.N.Craddock在“混合复合材料层板的力学性质与弹性极限”一文中, 分析了碳纤维、玻璃纤维增强环氧和碳纤维、芳纶纤维增强环氧两种混合复合材料的单向、正交、斜角和准各向同性

四种铺层层板的混合效应对力学性能的影响。R.Y.Kim报告了用碳纤维和S—玻璃纤维混合复合材料比纯碳复合材料在轴向拉伸和压缩下, 平面应力分量减少, 因此抑制了自由边缘的分层。

金属基和陶瓷基复合材料报告的比例较过去历届学术会议的高, 金属基复合材料占25%, 陶瓷基复合材料占7%。金属基复合材料包括制造工艺、界面、力学性能、微结构断裂、残余热应力与高温耐久性等方面的内容。除深入研究有基础的碳纤维/铝、SiC纤维/铝和硼纤维/铝外, 还研究TiC晶须和粒子增强Ni、Mg, SiC晶须增强铝合金等具有更好的性能。如在6061合金中加入16%的SiC晶须, 强度、模量比基体合金提高50%, 美DWA复合材料专业公司主要研制DWA1“20”粒子增强特种铝、DWG薄层(0.003”)石墨纤维(50%Vf)增强铝、镁、铜和硼/铝、硼/钛等材料, 具有耐高温、较高的硬度、热稳定、以及较基体金属更高的比强度和比模量, 制成片板管子和盒形体, 应用于空间和船用天线、水陆坦克及机械另件等。日本国家金属研究所S.takahashi介绍了在空间环境制备Ni—TiC复合材料, 研究在低压下对加工的影响, 用火箭飞弹下落的微重力条件, 在2Mpa压力下, 6分钟快速冷却, 经光学和电子显微镜分析样品指出, 重力减低而引起的TiC分布不均匀可忽略。英国B.Tolui研制了碳纤维增强钛铜合金, 论述了纤维与基体的界面化学, 基体成分、加工温度和时间以及纵向拉伸强度的关系。

陶瓷基复合材料耐高温、耐磨性好、硬度高, 适用于刀具、模具、转动摩擦件等受到了注意。会议上报告了碳化硅纤维增强氧化铝、碳化硅增强硅酸铝锂材料组分、制备与性能的关系。日本用碳化硼和二硼化钛制成BSC复合材料, 它的硬度如钻石。为了提高陶瓷的韧性, 注意研究以玻璃态陶瓷为基体, 如美国K.M.Prewo等用碳化硅纤维增强锂铝化硅(LAS)类玻璃陶瓷基体的复合材料, 具有高韧性高强度, 还可制成各种织物的复合材料。

日本的K.Okamura等用聚硅碳纤维氮化制成柔软的硅氮氧纤维(Si—N—O),在1300°C下具有1.8GPa的强度和139GPa的模量,比重为2.22;又用聚硅碳纤维和四丁基氧钛制成硅钛碳纤维(Si—Ti—C),在1300°C下具有0.94GPa的强度,129GPa的模量,比重为2.3。由此研制成的耐高温纤维是值得注意的动向。

二、先进复合材料的力学性能与破坏机理的研究

会议22个专题中有10个专题是关于复合材料力学方面的内容,文章占53%。包括各种先进复合材料的力学性能、损伤破坏模型、断裂与疲劳以及设计方法等。内容与其它部分相比,侧重规律性的研究,但有明确的应用背景,绝大多数有实验工作,单纯数学分析的较少,研究结果既有实际意义,也具有一定的理论水平。

研究复合材料的损伤和疲劳的报告占了相当的比重,而且采用了较先进的测试方法(声发射、红外热象、激光散斑、超声C扫描、增强X照相、立体图象分析以及微观观测等),实测在不同载荷条件下(静态、疲劳、冲击和高速变形下)不同组分复合材料、不同成型构成及不同缺口情况的损伤扩展,得出定性或定量的结果。而且注意宏观力学性能和微观分析结合,研究纤维、基体及界面等微结构损伤破坏过程及其对力学性能的影响。

在损伤与破坏模型专题中,报告了有关纤维周围微损伤扩展、界面破坏以及层间损伤破坏的研究。以实验方法测定强度,用加浓氟等增强X光检测界面破坏效果,采用光学和扫描电镜观测破坏形态,分类型建立微观破坏模型。美国Dorgles航空公司J.J.Tracy等研究了“冲击损伤对层压复合材料动态强度的影响”,采用直径为1/2吋的弹以138呎/秒的速度对四种石墨/环氧层板作冲击试验,分析并比较了受冲击前后层板的频率、阻尼和形貌,冲击损伤降低了试件的频率,实验结果与

有限元分析符合。

复合材料断裂专题包括纤维增强和粒子增强复合材料以及高速拉伸的断裂。日本K.Kawata报告了“复合材料与金属的破碎率的比较”,采用“one bar method”对碳纤维、玻璃纤维增强塑料和碳与玻璃纤维混合复合材料进行高速拉伸试验,应变率 $10^3/S$,结果表明,GFRP具有明显的高速韧性而CFRP对应变不敏感。还研究了碳纤维增强塑料层板的内断裂韧性的试验方法。

由于先进复合材料用于承受交变载荷的情况增多,疲劳研究工作的比重增大(ICCM—IV只占总文章数的8%,这次占11%),研究纤维和不同复合材料的疲劳裂纹扩展损伤累积、模型分析和寿命估算,包括碳、芳纶纤维和缠绕体的疲劳,以及在双轴或随机载荷条件下的疲劳研究。法国技术大学D.Leffbvre研究了碳纤维、玻璃纤维增强塑料复合材料在不同的疲劳载荷情况下,材料的破坏轨迹和损伤图象和微结构的关系,提出定量的分层模型。A.R.Bunsell报告了“用幅值分析监测CFRP复合材料结构的损伤过程”,通过分析记录声发射信号的幅值判别不同铺层的断裂机理。美国Drexel大学A.S.D.Wang报告了“在可变循环载荷下层板的累积分层扩展”,采用在常幅值的循环载荷下的能量积放增长率方程推广到变幅值循环载荷下分层增长率,在拉伸疲劳下,实验与计算结果一致。

复合材料的力学性能专题包括两部分内容,部分I是复合材料层板的力学性能,包括非线性性质、三维分析及带孔层板的层间应力与变形特性。美国G.D.Goonetilleke等用解二维问题的方法解三维问题,可预测层间正应力分布,它在较大范围内与数值解符合。部分II是关于复合材料板(曲板)屈曲性能的研究。

此外,日本东京大学A.Kohyama等报告了SiC纤维增强铝复合材料及其予浸丝的微结构与力学性能,采用透射电镜(TEM)附以EXDA观察拉伸后材料的微结构,致使强度下降的主要因素是纤维的退化、界面相的形

成, 基体中空穴的形成, 由此选择纯铝作为基体, 改进加工过程, 可比原来的平均强度提高1.1GPa。西德Karlsruhe大学的E. Fitzer等介绍了用化学气相浸渍法和用液态硅化合物予浸渍后反应接合法制造碳纤维和碳化硅纤维增强碳化硅基体工艺过程中的物理化学问题, 研究了不同纤维组成和不同制造方法对复合材料力学性能的影响。美国Delarac大学的T. W. Chov等研究了碳纤维和玻璃纤维增强环氧混合复合材料缠绕管的非线性应力应变关系, 提出了破坏判据的计算与实验结果相近。美国Stanford大学G. S. Shvinger研究湿热环境对复合材料力学性能的影响, 建立了能控制稳定温度、湿度的试验装置, 并有专门的计算程序。

一种新的复合材料诞生, 需要了解纤维和基体及其复合材料的最佳性能, 需要了解与控制相的界面, 需要研究它的破坏机理, 疲劳的影响及其控制因素。这些也是结构设计所必需的。由于复合材料的可设计性, 可以根据结构设计的需要选择纤维、基体的复合及不同铺层和工艺过程。先进复合材料使结构设计来一个飞跃, 可从原来需要具有不同性能的多种材料组合件通过制造单一的具有不同性能的复合材料构件来满足。因此, 复合材料的研制、设计与使用与力学性能关系密切。美国Lawrence Livermore国家实验室(LLNL)由T. T. Chia(焦祖韬)负责的复合材料研究中心, 组织了包括材料、化学、力学、机械等各方面专业的人员, 主要研究先进复合材料的铺层设计、及其在能源装置的应用, 如复合材料储能飞轮等。

三、先进复合材料应用的新进展

由于复合材料的先进性能, 价格趋于降低, 因此应用有了发展。例如碳纤维的价格与钢相比近10年在先进国家有了引人注目的下降(相对铜和铝的价格在上升), 在日本和美国生产沥青基碳纤维有可能使价格继续下降。当

然, 进一步降低复合材料的价格仍是使之能推广应用的主要问题。

先进复合材料在航空航天工业上的应用仍有所发展。航天飞机身段到长支架及回收舱都采用复合材料。“挑战者”号的头等烧蚀材料为碳/碳复合材料与陶瓷热片。宇宙飞船头部外层为高硅氧玻璃纤维增强聚胺酯树脂复合材料和Nomex蜂窝。日本报导采用碳纤维增强环氧作人造卫星的主要结构, 使卫星本身重量达到59公斤, 而在轨道上包括有效载重整体为550公斤重量级, 经试验, 其强度、刚度符合要求, 重量减轻有利于空间运输。复合材料低的热膨胀系数适用于通讯卫星。为了考察CFRP在空间环境的应用, 日本进行电子束辐射和热真空试验。

Voyager飞机由于采用了芳纶蜂窝芯和碳纤维夹板的结构, 可作253000哩的不着陆环球飞行, 途中不用加燃料。新型商业飞机Avtek400由于框架主要采用了两种强而轻的芳纶蜂窝结构, 翼梁用高刚度和压缩强度较好的碳纤维, 与一般飞机相比, 重量减轻一半, 提高了有效载荷和速度, 缩短了起飞、着陆滑跑距离。美军用飞机X-29的后掠翼和复合控制系统是由先进复合材料制造, 由此减少阻力、抗自转, 容许每秒调整翼面位置40次, 且满足其调整时高应力水平的刚度要求。发动机小, 消耗燃料也少, 因此造价也低。美国制造的直升飞机许多部件采用碳纤维和芳纶纤维复合材料, 而且通过合理的设计和成型工艺, 减少另件和连接固紧件的数目, 预计可减少90%的固紧件, 另件从11000个减为1530个, 造价降低而且结构更趋于安全。美国用碳纤维增强铝复合材料制作航天飞机下部机身面板与F-14、F-15的尾翼。并采用铸压成型的碳化硅纤维增强铝作为飞行器的驱动轴、风扇叶片及导弹构件。金属基复合材料还用于高温涡轮、活塞、导管等。

复合材料应用在汽车结构件上很有发展前途, 当主要用于要求耐用、抗疲劳和吸收能量的另部件。预计在2000年前, 复合材料的最大消

用于空间技术的纤维增强金属基复合材料

张国定 张贤淦

(上海交通大学复合材料研究所)

用高强度、高模量的耐热纤维增强金属可以制得比金属性能更为优异的新型材料。纤维增强金属基复合材料的性能取决于所选用的纤维和基体金属的类型及性能、复合材料中纤维含量和分布、复合材料的制造方法,以及界面效应。控制这些因素可以制得性能范围很宽和满足各种特殊要求的金属基复合材料。在一些使用温度高、另部件的尺寸稳定性和刚性要求

耗量将用于汽车工业。车身用SMC,先进复合材料首先用于传动轴、弹簧等,它们具有很好的振动阻尼性能。汽车框架、发动机都可用复合材料制成,一个构件代替原有的几个构件,从现有的15000个另件可能减少到几百个,汽车体积小、动力系统小,可以节约能源,汽车价格可望减至1000—1500美元一辆。金属基和陶瓷基复合材料开始步入汽车材料的行列,用以制造发动机另件。如陶瓷晶须增强铝合金的连杆、摇臂、驱动轴、活塞等。

会上还展出了具有良好电性能的复合材料波导元件和各种类型的天线,如瑞典研制成金属化的碳纤维增强塑料的波导天线,重量只有铝制的40%而不影响电性能和力学性能。采用高性能的复合材料或混合复合材料制成的绳索和电缆,具有轻质高强,高冲击强度,用于空间和军事上,可望代替铜绳索。法国Atochem公司展出用尼龙包复碳、芳纶、玻璃等纤维,可织成布或缠绕,和热塑性树脂复合,加热加压即可成型应用,引起了广泛的兴趣:

采用化学气相沉积法制成碳化硅、氮化硅织布的复合材料,制成单层、多层和夹层的结构,用作防热材料、飞行器结构、火箭喷管、

严的应用中,金属基复合材料具有比金属和树脂基复合材料更好的性能。所以它成为宇航、航空、电子等尖端技术部门的重要的新型材料。

较之树脂基复合材料及其它常规材料而言,金属基复合材料具有优越的性能,但获得高性能金属基复合材料的工艺方法有相当的难度。它必须在接近于或高于金属熔点条件下制

燃气轮发动机零件,以及装甲材料、原子能反应堆、化学容器和工业用炉子热交换器等。此外,复合材料用于风力发电叶片,形状从风扇形改为弓形,既简化了结构又延长了使用寿命。先进复合材料在生物医学和体育器械方面的应用也有了发展。

先进复合材料的发展将是使世界范围社会经济转变的组成部分,它使大量的制品改进为小型化、可塑的部件,从有限领域选择使用到各方面的应用;从短期使用到长期使用;从消耗能量到贮存能量;从手糊劳动到自动化生产;从以国内为主到国际网络;从资本投资到智力投资。复合材料的时代将促进这些变化。近20年材料消耗以钢和铝为主,但近10年先进复合材料每年以30%的增长率增加,预计本世纪复合材料将在作为结构材料的金属市场置换5—10%,90年代世界市场中,复合材料将达230亿美元,预浸件达30亿美元,另部件约为200亿美元,到本世纪末复合材料将占结构材料总价值的20%,到2030年估计增加到约占50%,这是一幅令人振奋的前景!