

英国、西德复合材料力学研究概况

先杏娟

(中国科学院力学研究所)

今年一月中旬到二月中旬我随中国科学院复合材料代表团赴英国、西德考察,先后访问了5个研究所、10所大学和5家公司,了解了英、德复合材料的一些发展情况和研究动向,同时也介绍了我们的有关工作,起到了学术交流的作用。

一、概 况

在英国访问的单位有国家物理实验室、原子能研究中心、富马研究所、B. P. 石油研究中心、Oxford 大学、Cambridge 大学、帝国学院、Surrey 大学、Kingston 技术大学、Newcastle 大学、Sheffield 大学、Nottingham 大学、Leeds 大学、Courtaulds 公司和 Dunlop 公司。在西德,我们访问了宇航院结构力学研究所、Karlsruhe 大学化学技术研究所、M. A. N.、M. B. B. 和 Sigri 三家公司。

复合材料由两种或两种以上的物质构成。它比单一材料具有高的比强度、比刚度、力学性能可以设计、疲劳性能好、容伤性好等特点,同时对节约能源也有重要的意义。近年来由于对复合材料的破坏问题和环境考验等研究有了新的结果,而且成本逐渐下降,因此英国和西德对发展复合材料相当重视,应用愈来愈广。可以说从宇航到一般机械,从军用到民用,从非承力件到主、次承力件,都在应用复合材料。复合材料现已用于卫星太阳能电池支架、天线反射板、空间实验室支架、导弹连接环等;飞机的垂尾、平尾、前缘、梁及型材、蜂窝壁板、地板、门窗框、刹车盘;直升飞机的旋翼、挂钩等;舰艇汽车的骨架、门、各种传力件;摩托车零件;风能转换发动机叶片,防弹衣,建筑材料,纺织机的梭子、档板;体育用具的滑雪板,羽毛球拍和高尔夫球棒等。医学上用作假肢和接骨。

增强元件重点是纤维增强。玻璃纤维强度高,价格便宜,应用仍较广。为了提高玻璃纤维的模量做了不少研究工作,如 Leeds 大学的 I. M. Ward 用聚乙烯、聚丙烯高速拉伸或高压挤出高度取向成纤维,或用板材拉成膜裂纤维(网状),用以增强水泥、环氧。拉伸比愈大,纤维的模量愈高,如线性聚乙烯(LPE)拉伸30倍时,最大模量可达170 GPa 而密度小于1。这些在实验室已研制成功,但在工业上应用仍有困难。碳纤维

被认为是最有发展前途的增强剂,它的综合性能好,强度模量高,可代替铝和钢,而且热膨胀系数小,振动强度高,具有电传导性,耐腐蚀,耐烧蚀和自润滑等性能。据美、日和欧洲碳纤维用量的统计,1978年为340吨,1980年为805吨,预计1984年为3575吨,六年间增加10倍多。西德关于碳纤维复合材料用量的增加和价格的下降,如图1所示。

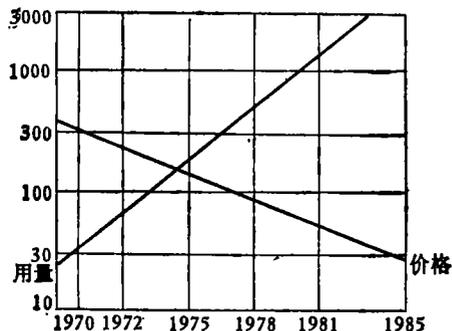


图1 碳纤维复合材料用量的增长与价格的下降

提高碳纤维性能的关键在于原丝的质量和表面处理。原丝以聚丙烯腈为主,沥青碳纤维由于提高模量等性能有困难,作为碳/碳复合材料改善烧蚀和抗热震性及作为廉价民用材料还是可以适当考虑的。Kevlar 纤维比重小(1.35),抗拉强度高,冲击性能好,热膨胀小,适用于航空发动机尾喷管、高压容器等,但由于分子结构的原因,固化时原丝易分裂,抗压强度低,模量不如碳纤维高,因而不能作为第三代纤维代替碳纤维。硼纤维由于成本高,西欧已不发展,只作为性能研究的材料来用。西德研制的碳化硅纤维增强树脂或金属,它的比强度比模量高于碳/环氧与硼/铝材料,并研究在碳纤维上气相沉积一层 Sic 以提高抗氧化抗腐蚀性能。玻璃纤维或芳纶纤维与碳纤维混合是一种很有效的增强型式,既能根据使用要求提高性能,又能降低成本。空心纤维(玻璃或碳纤维)已在西德研制成功,它的比刚度大,制成构件的稳定临界载荷高。

从复合材料的基体材料看,高聚合物仍是重点,能满足常用结构的要求。英、西德仍以环氧、不饱和树脂、聚砜亚胺为基体材料,并注意改性研究及辅助剂的研究。由于纤维与金属基体的界面反应问题难解决,

而且价格高昂,应用较困难,英、德不发展金属基复合材料。硼增强铝、碳化硅增强铝能承受高温,制造叶片还是需要的,因此美国给予一定的重视。陶瓷基的复合材料可作为功能材料如测氧敏感材料、半导体器件等,但作为结构材料很少,因性脆($K_{Ic} < 20\text{MN}/\text{M}^{3/2}$),界面反应困难,因而没有得到财政上的支持。短纤维增强热塑性材料是一种有发展前途的用于民用的好材料,能注模成型、经济,分析和技术要求可以简化,但热塑料一般不采用连续纤维增强,因热塑性材料比热固性材料对冲击敏感,刚硬,不易成型为复杂形状的构件。

总的来看,发展碳纤维增强聚合物复合材料是一个重点。

二、复合材料力学的主要研究工作

复合材料力学主要是研究复合材料的破坏。因为复合材料的破坏与金属相比具有许多不同的特点。金属一般是断裂破坏,而复合材料有基体开裂、纤维折断及界面分层等破坏型式。复合材料的动态破坏与静态破坏不同,静态破坏不能预测它的疲劳破坏。只有弄清复合材料的破坏规律,才能更充分可靠地使用它。

1. 复合材料的断裂破坏研究

复合材料的裂缝扩展很复杂,不加分地使用线弹性断裂理论是不适宜的,因此需要研究把线弹性断裂力学推广到各向异性材料再推广到纤维增强复合材料。在实验研究方面,英国的NPL、Surrey大学、AERE、Cambridge大学、Fulmer研究所和Kingston技术大学及西德宇航院结构力学研究所都做了不少工作。他们采用先进的测试手段。研究裂纹扩展规律与不同性质材料、不同几何尺寸、不同纤维含量 V_f 、不同的纤维铺层角度、不同缺口情况的关系,Surrey大学研究了GRP、CRP及Hybrid的断裂。纤维增强复合材料受拉伸时,裂缝一般在层间在界面传播,纤维能阻挡和延缓裂缝扩展,但有损伤区。横向裂缝在 90° 层扩展, 0° 纤维起阻挡作用。对碳纤维复合材料,他们发现裂缝扩展与碳纤维的表面处理有关,如果表面处理好,界面结合强,由于碳纤维是各向异性的,纵向强横向弱,当界面结合强度大于纤维的横向强度时,横向裂缝可穿过碳纤维(从显微观察可看到)。这是较少有的情况。横向裂缝产生的另一种形式是由于大的和空的纤维过早出现横向裂缝。 45° 铺层断裂,主裂缝在 45° 方向,附近有微裂纹。采用可移动的光学显微镜观察不同循环次数下裂缝的数目。

关于混合复合材料(一般是碳纤维和玻璃纤维或Kevlar纤维混合)有三种形式:一是纤维混合渗入基体缠绕,可看作是均匀的,目的是为了提平均的刚度、疲劳与冲击性能;二是不同纤维复合材料薄片混合

层压,铺层可以平行或任意方向,分析比较复杂,用于特殊的结构;三是根据受力要求局部增强某一部分,如集中铺设一片碳纤维或在靠近表面局部加强,提高构件的弯曲刚度。混合复合材料的载荷-伸长曲线是有皱褶的。这是由于部分纤维断裂而整体仍能承载的缘故。第一个皱褶点被认为是第一裂缝的产生。它与纤维的直径、铺层角、界面面积有关,即两种纤维应力传递有关。根据两种承力元件纤维的延伸率不同,来研究其相互影响与应力应变的关系。NPL和Surrey大学的实验与分析表明,低延伸率纤维断裂时不出现高延伸率纤维的应力集中,并指出低延伸率纤维的含量应小于高延伸率纤维的含量(如图2)。裂缝的间隙也可以估算。

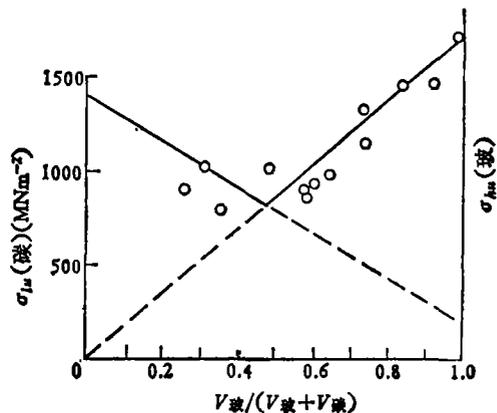


图2 碳-玻璃-环氧混合复合材料拉伸强度与玻璃纤维含量/总纤维含量曲线

英原子能研究中心研究复合材料带缺口拉伸断裂,试件几何尺寸变化的范围很大,但对结果影响很小。试件的形式认为无缺口的两端需加强,有缺口的不用加强端部。试验结果用计算机处理。

剑桥大学主要进行复合材料的微结构断裂破坏研究。Dr. Beaumont研究增韧树脂(在基体中加橡胶粒子)和复合材料在扫描电镜中加载观察裂缝扩展。树脂中橡胶粒子的拉长断裂过程,大量吸收裂缝扩展能量,提高韧性。在电镜内以两种形式加载,一是三点弯曲,一是双扭。在试件上涂上感光材料,用一个底片先照出直径一微米、间距4微米的斑点,这些小斑点变形前是规则排列的,距离是不变的,受载变形后,排列情况改变,距离也有变化,由此可以分析在裂缝尖端的应变分布。按三种破坏模型(纤维折断、纤维拔出及脱胶)采用半经验公式计算,断裂功随纤维含量 V_f 不同而不同。结合用电视录相记录扫描电镜可观察微裂缝的生长和传播过程,以研究复合材料微结构破坏机理。

Surrey大学的扫描电镜也能加载,研究复合材料分层破坏情况。还有一台能加温至上千度的扫描电镜,并用半波石膏板可拍彩色的扫描照片。

2. 复合材料的疲劳

复合材料的疲劳性能比金属好，一般金属疲劳极限在 20—50%，先进复合材料在 50% 以上，有较大的损伤容限。与金属疲劳相比有以下特点：一是破坏形式复杂，有基体开裂、纤维断开及分层等，有一个过程，不象金属有明显的门槛值。复合材料要考察刚度变化的循环数。复合材料结构一般用于低频高应力，以此作为临界设计因素。二是复合材料的疲劳强度与组分、纤维铺层方向、界面粘附和加载条件有关。因此，英、西德很重视复合材料疲劳的研究。

Nottingham 大学机械工程系以 M. J. Owen 教授为首的复合材料研究组近 20 年来围绕复合材料的疲劳作了大量研究工作。从 GRP、CRP 到短切纤维增强及混合复合材料，系统地研究了复合材料疲劳破坏；从一般试件到带孔试件，研究了孔周围的应力分布，并采用有限元程序计算。近期工作是双轴应力下（轴向、内压）的疲劳破坏，自行研制双轴疲劳机，进行玻璃钢圆筒的试验，给设计提供依据，同时研究双轴应力状态下的疲劳准则。对 GRP 圆管进行了 2000 次双轴疲劳试验，观察脱胶和纤维断裂，疲劳的破坏表面与静态的不同。在单轴条件时压缩强度小于拉伸强度。

西德宇航院结构力学研究所 Dr. Prinz 为首的研究组对 GRP、CRP 与混合复合材料的疲劳做了大量研究工作。研究了不同几何形状的试件（哑铃形、矩形、带排孔）、不同铺层，不同孔径在不同频率下的疲劳特性及破坏规律。对 GRP 矩形无缺口的结果最分散，疲劳寿命与带直径 1.5 mm 的排孔试件相近。破坏的循环次数随孔径的减小而增大（孔径从 0.5—9 mm，共有 5 个孔，如图 3 所示）。用有限元方法计算孔周围的应力分布及各层的应力。带角度铺层的试件 $[0^\circ, 90^\circ, \pm 45^\circ]$ ，受拉时首先在 90° 层出现裂缝，然后在边上沿 0° 与 90° 层间扩展，受压时裂缝在 45° 与 0° 之间出现，由于剪切应力和剥离应力而分层。进行拉-压疲劳时，为了防止试件屈曲采用抗屈曲的装置——夹板夹持试

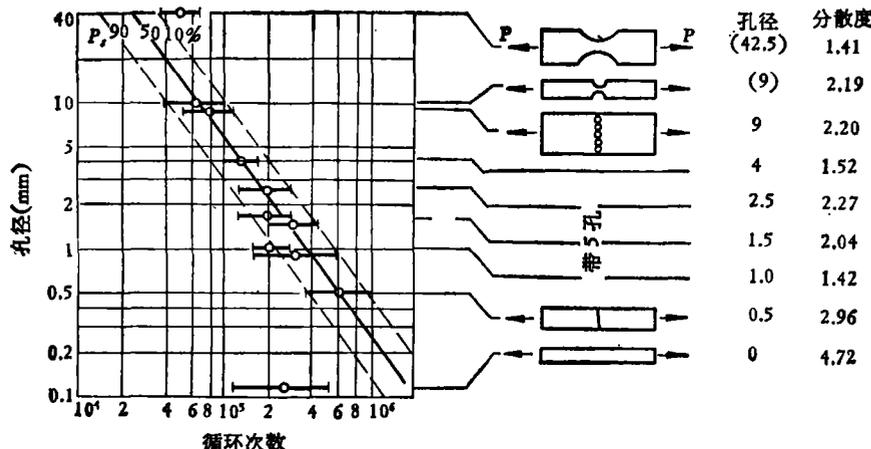


图 3 玻璃钢试件孔径大小与破坏循环次数的关系

验段，疲劳强度比不采用夹持的高。GRP 受温度影响较大，实验时采用气冷比不气冷高 70%。

AERE 对湿态复合材料薄壁圆管施加扭矩进行剪切疲劳研究。试件端头为方形，以便夹持。一种是复合材料整体试件，一种是铝方头与复合材料圆管连接。采用载荷传感器和应变花测量，并用声发射和放大观测破坏过程。

3. 环境及长期强度的研究

NPL 研究 GRP 在湿环境下的长期强度。GRP 在水中拉伸，温度从 -150°C — 150°C ，由于水通过树脂的过程是扩散运动，温度影响很大，差 10°C 结果相差很远。采用曲柄滑块施加低周循环作疲劳实验，结果表明低周疲劳在水中能对长期强度影响不大。不同纤维、树脂体系随时间增长强度损失的情况不同。碳纤维强度降低最慢，耐碱玻璃纤维比 E-玻璃维持强度的时间长一年。聚合物基体复合材料在水介质中的应力腐蚀，强度随浸泡时间缓慢下降，主要是由聚合物本身和界面破坏而引起。

Surrey 大学将复合材料放在硫酸溶液中加 30% 破坏强度的拉伸载荷作应力腐蚀，破坏断口很平滑，同时也作四点弯曲试验。混合复合材料的热变形与纤维含量 V_f 及层的厚度有关，薄层能抑制裂缝的扩展，如在 4mm 厚层横裂缝存在，但在薄层 2mm 即不出现裂缝。

Kingston 技术大学的 Dr. Pritchard，研究 GRP 在水和酸溶液下浸渍破坏，液体使复合材料分层，沿纤维树脂界面开裂。

Fulmer 研究所采用大试件（25 cm × 12.5 cm）浸水做断裂试验，用喷雾器直接将水喷在缺口顶端，至试件被浸渍饱和（试件重量随浸渍时间不变时）才进行试验。尽管结果表明水对 GRP 的临界断裂韧性影响很小，但设计时仍要谨慎。因破坏一开始即发生大程度的破坏，要考虑安全系数。他们认为对 GRP 层间断裂韧性采用弹性断裂理论是足够的，但对缠绕的 GRP 横向层的断裂由于实际的粘弹性滞后行为使得线弹性分

析不合适，采用等值积分法更适于应用。

4. 非破坏性试验 (NDT)

非破坏性试验用于确定复合材料的内部表征，如空穴、纤维含量、层间裂缝、纤维接头及潜在的缺陷等。各单位都很重视，有的专门设立一个研究室，配备先进的手段。

(1) 利用超声脉冲扫描与超声频率分析技

术,来检测复合材料的缺陷。大水槽可作大面积的探测,从波形的不规则探测材料的强弱与分层,与标准波形相对比较,尚不能绝对的定量。

(2) X光透射法检测分层,从试件边界处涂上有有机溶剂,溶剂能渗进,渗进的区域就是分层的区域,溶剂不透X光,再用X光照射后,即可观察到分层破坏情况。X光照片可与超声扫描的图象对照,缺陷的形状、大小(如孔、气、分层等)很相近。超声探伤后在缺陷处打小孔,渗入感光材料(Peltier-Elment),再拍照片,看到更具体的破坏区域。

(3) 光学显微镜 有一系列 *In situ Optical Microscope* 可观察试件的局部状态:一种是 *Travelling Microscope* 将试件侧面抛光,在试验中可移动光学显微镜观察试件的破坏过程和裂缝的数目,应用较普遍;还有上千度的高温显微镜。

(4) 声发射装置 通过材料或结构受载时产生裂缝或裂缝扩展时发生应力波即高频率的声波作为信号,来检测材料内部的缺陷。对高强度脆性的复合材料声发射更敏感更丰富。树脂开裂时释放小能量的声发射信号,纤维断裂释放大能量的声发射信号,可检测粘着强度,应用于检测卫星天线的破坏。

(5) 激光全息与纹影法 全息摄影应用相干激光,可测量微小的位移和变形(接近光波波长)。由全息图上可检测复合材料的缺陷(分层、切断)的数量和方位,并可测出加载下试件的应力分布和位移。

以上几种方法的选择,大面积探伤以超声扫描为有效;配合试验机进行试验检测破坏以声发射为好;X光透射探伤和一般光学观察法较为方便。

此外,光声光谱和超声波显微镜以及红外、微波、磁涡流等新技术也开始用于复合材料的研究。

5. 复合材料动态力学性能

关于复合材料的冲击试验,NPL和Doulop技术部用摆锤式落锤法测量复合材料的抗冲击性能,采用传感器、加速度计记录纸带和曲线,得出断裂功。冲击能量不同破坏不同,高速冲击时,试件出现分层现象。

Surrey大学研究45°铺层薄壁圆管冲击载荷下的破坏。破坏区域随冲击能量不同而不同。撞击速度为20米/秒时,破坏在撞击处,速度为50米/秒时,破坏在撞击区旁边。这是由于复合材料角度铺层各向异性拉、压应力部位不同,冲击波动传播影响不同的原因。

Oxford大学机械工程的Dr. Harding研究了复合材料的动态力学性能。一是编织玻璃纤维布增强树脂材料冲击压缩强度在不同树脂配方和纤维布配置下动态压缩试验,研究破坏模型与树脂力学性能的关系。二是碳纤维复合材料冲击抗拉强度和破坏,用光弹照相,数据自动采集,拉伸的夹具用金属圆柱体开槽夹持片状试件。碳纤维正交铺层断裂面平,玻璃钢有纤维拔出。三是结合应用任务研究不同的动态破

坏及能量吸收机制。

Fulmer研究Kevlar层板及K纤维/树脂防弹衣的冲击韧性,结构上层质硬反弹,下层质软吸收能量,研究枪击时的破坏过程。

6. 复合材料结构力学

(1) 复合材料与金属构件复合结构。根据受力特点在金属承力件上附加复合材料板(一般贴上CRP),使结构加强而重量减轻。西德宇航院空中汽车A300B的起落架导轨采用Ti合金和CRP复合代替铝减轻24%,提高了使用寿命。由于纤维增强件有阻止和延缓裂纹扩展的作用,改善了容伤性,在模拟飞行载荷下,CRP加强件的裂纹扩展率只有未加强的10%,而承受了增加6000次飞行的最大载荷,经济价值相当大。试验采用模拟计算机控制,数据信息自动处理。在结构件试验前先作试件试验。在工字梁上粘一块CRP研究在-55℃—82℃的压缩疲劳,高温时粘着层有明显的蠕变从端部开始缓缓破坏,低温时没有蠕变现象,粘着层突然分层。复合结构很有潜力。

(2) 复合材料结构稳定强度问题 西德宇航院结构力学研究所研究复合材料圆柱壳的轴压稳定与内压实验分析。对GRP、CRP混合复合材料和空心纤维不同几何尺寸的圆筒进行实验与分析。大复合材料壁板在液压加载架上进行拉压复合及扭、剪等强度实验,多点应变测量自动采集与处理数据。英帝国学院在卧式液压夹具上进行加肋板的稳定实验,大复合材料壁板双轴拉伸及构件的落锤冲击试验。

三、几点体会

英、西德对复合材料的发展相当重视。不少著名的大学和研究单位都开展了复合材料的研究工作。一些有名望的专家、学者,从原来对单一材料的研究转向复合材料的研究。无论是生产纤维的公司或应用部门,都有不少研究力学的人员和设备。因为复合材料本身就是一个力学结构,考虑了力学观点才能合理的铺设纤维和不同力学性能的纤维如何混合使用。从狭义来说,材料的力学性能研究工作是检验、鉴定材料的各种强度、刚度等;从广义上来说,是研究如何更有效地使用材料。复合材料代替金属,比重上能减轻20—30%,如果力学设计更合理,将能减轻50%(现在的安全系数过大)。这对节约能源和宇航应用都有很大的优越性。

英、西德对复合材料的疲劳、断裂、环境试验、动态力学性能、微结构破坏机理等方面的研究较为重视。这些课题在我国进行得还较少,有的甚至是空白。关于混合复合材料和短纤维增强复合材料的研制,我国开展的也很少。今后应结合我国的情况,积极地开展这方面的工作。

(下转第76页)

损伤力学得到了与试验很相符的结果。例如：J. L. Chaboche, H. Kaczmarek 的“关于 316 不锈钢硬化与疲劳损伤的相互作用” A. Plumtree, J. Lemaitre 的“高温疲劳时损伤机制的相互作用”，与 J. Mazars 的“混凝土结构的机械损伤与断裂”。

法国 H. D. Bui 教授等的邀请报告“在弹性与塑性固体中损伤的传播”中对于两种特殊材料(即弹性材料，当应力达到屈服极限时及理想弹塑性材料当应变达到某一极限值时， D 值由 0 突变至 1) 得到稳恒静动态与动态扩展 III 型裂纹的解析解与 I 型裂纹的有限之数值解。法国 G. Rousselier 采用的损伤参数不反映在材料本构关系的有效应力，而反映在材料的质量密度上，在这次大会上也提出了新的结果。

过去人们往往把裂纹尖端附近的材料当作普通的材料(例如试验机上的拉棒)对待。这显然是不合理的。实际上，裂纹尖端附近的区域充满着微细裂纹与空穴，而损伤力学正是以损伤参数来反映这一事实的。总之，损伤力学是目前比较活跃的领域。欧洲力学组织 (EUROMECH) 于今年 9 月份在巴黎第六大学试验室由该试验室主任 J. Lemaitre 主持召开“损伤力学”讨论会。

3. 裂纹尖端奇异性与非线性断裂力学

裂纹尖端奇异场在断裂力学的发展中是一个核心的问题。线弹性断裂力学采用应力强度因子 K 作为应力应变奇异场的度量。对于线弹性断裂力学适用的几乎所有的材料，在裂纹尖端附近，非线性效应(例如塑性、蠕变、非线性弹性)都交织在一起，使得线弹性力学的假定失效。但是，尽管如此，在某些限制条件下，应力强度因子仍然作为裂纹尖端附近行为的唯一的度量，起着控制作用。这就是线弹性断裂力学的基础。

美国 J. W. Hutchinson 教授在题为“非线性断裂力学中的裂纹尖端奇异场：对现状的评述”的邀请报告中指出：非线性断裂力学的近期发展与早期线性理论的发展有着极为相似之处。 J 积分是按小应变塑性形变理论的奇异场的度量。在裂纹尖端附近，由于塑性形变非比例增长、有限应变的效应及微孔隙与微裂纹的存在，形变理论已不适用。但是在某些限制条件下， J 积分对中等范围与大范围屈服时的裂纹尖端附近的行为仍然起着控制作用，即使当裂纹有少量的扩展亦是如此。Hutchinson 介绍了他与 P. C. Paris 近年来对这一问题的研究成果。上述限制条件应该是：

(1) HRR 奇异场的有效区域尺寸比断裂过程区大得多；(2) 材料的撕裂模量值比较大，因而裂纹扩展是少量的。在这些条件下， J 阻力曲线就可用于研究裂纹扩展过程中的稳定性。

J 阻力曲线的这一应用虽然很重要，但却带有严重的限制条件。因此近年来开展了关于扩展裂纹尖端应力应变奇异场的研究，期望把这奇异场和材料分离准则结合在一起能得到裂纹扩展的规律。美国 R. M. McMeeking, J. D. Achenbach 和西德 H. Riedel 都在会上报道了他们关于静态、动态与蠕变态下扩展裂纹尖端奇异场的数值解与解析解。Hutchinson 在邀请报告中着重提到我国代表所得到的对于硬化材料扩展裂纹尖端奇异场的解，指出这一问题过去一直是难以捉摸的，他本人曾花费过大量的时间而未能得解，在大会最后的总结报告中，美国 J. R. Rice 教授也提到这一工作。J. R. Rice 在理想塑性材料扩展裂纹奇异场解的基础上发展了新的裂纹扩展准则。Hutchinson 认为这个方向——以裂纹尖端局部准则为基础的扩展裂纹分析，虽然还只有初始的尝试(L. Hermann 与 J. R. Rice)，但却是大有希望的。在大范围屈服条件下，超出 J 控制范围的裂纹扩展准则与分析将是今后的重要研究课题。

在试验技术方面，有西德 K. H. Schwalbe 题为“试验技术”的邀请报告和分组报告 29 篇，涉及动力断裂韧性、裂纹动力传播与止裂、裂纹长度测量、裂纹尖端应力应变测量与断裂韧性测量等方面。

在断裂物理方面，从会议的论文看，主要偏向于一些实际材料的测试工作，并对裂纹的沿晶与穿晶成核与扩展表现了较大的兴趣。

我国的邀请报告是“高应变断裂分析”、分组报告有：“平面应力弹塑性断裂模型及其有限之分析”，“应力腐蚀与氢致延迟断裂机制”，“在硬化材料中稳恒裂纹扩展的弹塑性场”与“关于混合型断裂的最大能量释放率准则”，断裂力学进展圆桌会议的报告“断裂力学在中国的概况”，和关于陶瓷和 X 光分析的两篇展览论文。另有两篇分组报告“韧性断裂的物理模型及数值分析”、“非对称载荷的 Griffith 问题”，虽已刊印于论文集，但由于作者未能出席会议而没有宣读。

(黄克智)

(上接第 72 页)

复合材料是非均匀、各向异性的材料，分析工作很复杂，需要先进的测试手段才能进行微结构力学的研究。我国科研人员的理论储备、学术思想、工作能力并不差，和先进国家相比，主要差距在于设备手段和交流

两个方面。我国限于物力，不可能要求齐全，但应有计划在有关单位布局；同时配有好设备的单位应面向同行，加强协作，充分利用。在资料和情报的学术交流上，应尽量创造条件，便于国内外学术交流和加速情报资料的交换。