

力学行为研究在新材料发展中的作用

——评第六届国际材料的力学行为会议

吴学仁 颜鸣皋^{*}
(北京航空材料研究所)

本文概述了第六届国际材料的力学行为会议(ICM6),着重介绍了各国在新材料的力学行为研究中取得的最新成果,并讨论了它在新材料发展和应用中的重要作用。文章最后就如何加强我国在该领域的研究提出了几点建议。

关键词: 力学行为, 材料力学

Role of Research on Mechanical Behaviour in the Development of New Materials —— A Brief Assessment of ICM6

Wu Xueren Yan Minggao
(Institute of Aeronautical Materials, Beijing)

The article gave an outline of the sixth International Conference on Mechanical Behaviour of Materials (ICM6). Attention has been focused on the recent international achievements in the research on mechanical behaviour of novel materials, and its role in the new materials development and applications. Finally some proposals for strengthening China's efforts in this field were made.

Keywords: mechanical behaviour, mechanics of materials

一、概 况

第六届国际材料的力学行为会议(ICM6)于1990年7月29日至8月2日在日本京都国际会议中心召开。这是继四年前在北京召开的 ICM5后国际学术界和工程技术界在材料的力学行为研究方面的又一次大型会议。北京航空材料研究所颜鸣皋教授为本届 ICM 执委会主席,吴学仁研究员为执委会秘书长。

ICM 的前5次会议分别是在日本、美国、英国、瑞典和中国召开的。与历届会议的约300~400人的规模相比,ICM6堪称盛况空前,超过了800人。会议代表来自31个国家。其中东道主日本300多人,中国代表40多人。ICM6的盛况突出反映了各国在发展高性能新材料对材料的力学行为和应用性能的高度重视和在这方面已经取得的丰硕成果。

本届会议由日本材料科学学会和国际科学促进基金会联合组织,京都大学主办。东道国日本为办好这次会议作了很大努力,日本工业界为会方捐赠了资金,日本的英文报纸以整版篇幅报道了 ICM6的开幕式,并全文刊登了主席颜鸣皋教授的开幕词和他的照片。

二、研究动态分析

尽管材料的力学行为长期以来就受到材料研究和结构设计人员的高度关注,但由于受到当时材料发展与结构强度水平本身的限制,直到60年代才进入其迅速发展的时期。随着疲劳断裂力学与可靠性理论的发展,以及由之带来的结构设计思想的革新,再加上越来越苛刻的使用条件对材料提出的要求,力学行为作为连结材料与结构之间的桥梁作用也日趋突出。从材料研究发展的角度看,力学行为是新的结构材料追求的主要目标;从结构强度设计的角度看,任何新材料在结构上的应用将决定于人们对它在实际使用条件下的力学行为的了解程度。正是由于这两方面的驱动力,使得材料的力学行为研究在近二十年中受到前所未有的重视并迅速成为一门交叉性很强的学科,这种交叉性在 ICM6会议中反映得非常明显。

与历届会议有别,ICM6只安排了两篇大会报告(其余的邀请报告和基调报告都是在各分会会场作的)。加拿大 Alcan 国际有限公司 Edington 博士的“轻型结构设计中的材料发展:供应商的看法”从材料供应商的角度来看

^{*} 颜鸣皋教授为中国科学院学部委员、本刊编委会主任委员

轻型结构设计中材料技术的发展,并以飞机结构和汽车工业为实例讨论了航空铝锂合金的发展、物理冶金、损伤容限特性、一般力学性能、成本以及未来的展望。日本京都大学 Shiraishi 教授作的“濑户大桥建设中的前沿技术”介绍了日本濑户大桥的建造、材料 and 设计技术。

ICM6论文集共收入论文(及详细摘要)615篇,按研究专题可分为以下19个方面:

计算塑性力学	41篇
动态塑性力学与断裂	57篇
可靠性分析与设计	15篇
先进材料的统计力学性能	11篇
计算机辅助疲劳技术	7篇
结构完整性评估的先进技术	43篇
新型材料和功能材料的疲劳	41篇
应力腐蚀与腐蚀疲劳	47篇
纤维增强复合材料工艺与界面	14篇
金属基复合材料的强度与断裂	14篇
金属间化合物的力学性能	13篇
聚合物合金的结构与性能	16篇
新型材料的力学行为	64篇
本构关系与损伤力学	40篇
断裂与断裂力学	64篇
疲劳及其机理	56篇
蠕变与高温强度	27篇
试验与评价中的新技术	33篇
影响力学性能的因素	10篇

三、新材料发展中的力学行为研究

由 ICM6 的文章数量和复盖面可以看出本届会议涉及到许多材料和许多学科。这里,我们将不可能从所有的方面来评价这次会议,只准备把注意力集中在本届大会的最具特色的若干方向上。应该指出,历届 ICM 和几个主要领域,如疲劳、断裂、本构关系、高温性能及腐蚀等仍然有大量的研究。然而必须看到,ICM6 的中心议题已转到与各类新型材料的力学性能有关的领域内。1987 年的 ICM5 与新材料有关的论文篇数近 30 篇,而这次会议则近 300 篇。这个数字有力地表明,各国、尤其是先进工业化国家在新材料的发展中越来越重视材料的力学行为及其评价技术的研究。ICM6 涉及到的新材料主要包括:陶瓷和陶瓷基复合材料,纤维增强复合材料,金属基复合材料,铝锂合金,金属间化合物,聚合物合金等等。限于篇幅,下文仅介绍一些较有代表性的工作。

1. 陶瓷和陶瓷基复合材料

美国加州大学的 Dauskardt 和 Ritchie 的“陶瓷和陶瓷复合材料在交变载荷下的疲劳裂纹扩展”引起众多与会者的注意。他们研究了相变增韧的 Mg-PSZ 陶瓷和 SiC 晶须增强的氧化铝复合材料在交变载荷下的裂纹扩展行

材料工程

为,发现 Mg-PSZ 的无缺口悬臂梁试样的 S-N 曲线在拉一压循环下比拉一拉循环下低得多;另外;这两种材料基于“长裂纹”(≥3mm)的紧凑拉伸试样的裂纹扩展速率与 ΔK 之间的关联指数 n 值高达 20,甚至可到 100 (金属材料的 n 值约 2~4)。这意味着寿命对应力水平的极度敏感(载荷增减一倍将导致寿命升降 6~30 个数量级!)。另一方面,陶瓷材料的门槛值 ΔK_{th} 可达到 K_{Ic} 的 50%,而在低于长裂纹门槛值 2~3 倍的 ΔK 水平下,就能够观察到小表面裂纹的扩展。作者从内在与外在(intrinsic/extrinsic)机理研究了陶瓷的疲劳行为,并且讨论了它给设计准则带来的影响,从外在机理解释了在拉一压循环下如何因为裂纹尖端屏蔽作用的降低(由于相变增韧作用的下降和桥联区的破坏而引起)而导致寿命的大大缩短。

英国伯明翰大学 Beevers 教授领导的研究人员对陶瓷材料的疲劳裂纹扩展和短裂纹行为,以及陶瓷基复合材料的断裂也作了许多实验研究。尤其值得注意的是通过对含连续 SiC 纤维的陶瓷基复合材料在室温和 800°C 高温下的疲劳裂纹扩展试验发现:纤维与基体间的界面的行为对疲劳起着关键作用,在室温条件下一般是通过纤维与基体界面的脱落形成多条长裂纹,且纤维对基体裂纹仍起着桥联作用。在高温下比较典型的情况则是由一条 I 型裂纹主宰。所以把断裂力学参量应用室温条件应该谨慎,而在高温下则效果将较好。

2. 金属基复合材料

当前金属基复合材料在航空航天及汽车的主要受力结构上的应用所面临的最重要、紧迫的问题之一就是这种材料的疲劳损伤容限性能的表征。日本科学技术署在这方面做了很系统的研究工作,其最终目的是要建立高性能(高强度、高韧性、高耐久性)复合材料的新的设计方法。由 Hirano 作的题为“金属基复合材料的疲劳裂纹扩展特征”一文总结了日本在航空航天用高性能复合材料的研究与发展方向。日本已经建立了高性能材料的试验技术,甚至对一些高性能材料在超高温下用断裂力学参量来表征它们的力学行为。他认为,对于晶须增强的高强铝基复合材料来说,最重要的力学性能是耐久性(指疲劳和损伤容限特性)。为此他们研究了 SiC_w/2025Al 的 $da/dN \sim \Delta K$ 关系,发现在双对数座标中,该直线段部分的斜率比一般的金属材料要高,另外,晶须增强的铝基复合材料也存在门槛值 ΔK_{th} 。一个突出的问题是试样取向对 $da/dN \sim \Delta K$ 关系有极为明显的影响,在有些情况下甚至会导致 1 至 2 个数量级的差别。对于连续纤维增强的金属基复合材料,裂纹扩展路径与基体金属及纤维/基体界面特性都有关。例如 SiC_{cvd}/Al 与 SiC_{cvd}/Ti 两种材料的裂纹扩展行为就有明显区别,对于横向的疲劳裂纹扩展,应力比和基体金属的影响都很大,应力比的影响可由裂纹闭合作解释,而基体金属对 $da/dN - \Delta K$ 的影响则可以成功地用 $\Delta K/E$ 来关联。

英国伯明翰大学 Beevers 等对金属基复合材料的疲

劳裂纹扩展也作了广泛的研究。他们研究了20%SiC颗粒增强的铝硅合金(A356)在室温和高温(220℃)下的疲劳行为,发现在室温下SiC颗粒的断裂促进裂纹闭合,从而降低裂纹扩展速率,而在高温下由于基体的变形,裂纹一般绕过SiC颗粒扩展。在另一篇报告中,他们研究了SiC连续纤维增强的Ti-6Al-4V基复合材料的裂纹扩展,发现其裂纹扩展速率 da/dN 与所施加的交变外载引起的 ΔK 之间不存在唯一的关系。经分析这是由于裂纹面上未断纤维的桥联引起的。这种桥联作用导致裂纹扩展速率对裂纹尺寸的依赖性,在利用权函数法对桥联引起的裂纹尖端的应力强度因子的降低作了定量计算后,成功地用断裂力学参量关联了这类材料的裂纹扩展速率。这些研究表明,与普通金属材料相比,金属基复合材料的疲劳裂纹扩展行为要复杂得多,影响的因素也很多。这里强调微观观察与宏观试验及力学分析相结合就显得更为必要。

3. 铝锂合金

铝锂合金方面一个很有代表性的工作是美国华盛顿大学Kobayashi教授的“铝锂合金的断裂和疲劳裂纹扩展分析”。他们对2090-T8, 2091-T3的0.8~1.6mm薄板用CT试样测定了J-R阻力曲线,用SEN试样测定了长、短裂纹的 $da/dN-\Delta K$ 关系。发现2091-T3的抗断裂性能比2090-T8E41和2024-T3都高,并且两种铝锂合金的长、短裂纹的扩展速率一般都比2024-T3低。

英国Bowen博士对Al-Li金属基复合材料在室温和高温(150℃, 250℃)的疲劳裂纹扩展速率作了测定,发现以20 μm 的SiC颗粒增强的Al-Li复合材料比用3 μm 或7 μm 颗粒的抗裂纹扩展性能好。另外,所有这3种材料(3 μm 、7 μm 、20 μm)在高温下的抗裂纹扩展性能都比室温下好,作者认为断裂了的碳化硅颗粒会使裂纹扩展速率降低。

4. 纤维增强复合材料与界面

随着纤维/基体的界面(interface)和“界面相(interphase)”对于复合材料的物理和力学性能所起的重要作用被广泛地认识到,高性能的聚合物基体复合材料的界面问题已经得到高度重视。传统的试探法(trial-and-error)已难以对付材料研制中的复杂性,因为随着参数的增加,试探的次数将会大得惊人。所以只有进行复杂的化学/力学设计,才能发展出高性能的复合材料。这就得通过系统的界面/界面相的研究来寻找一种制造复合材料的科学方法。美国Ishida教授为此提出了“界面相工程(interphase engineering)”的概念。他认为必须严格区分界面和“界面相”。界面是指两种不同材料的假想结合面,而只有当这两种材料完全不相容时,这个界面才可能存在。这种情况实际上是极少见到的。常见的是存在着一个渐变的过渡区,称为“界面相”,其厚度取决于该材料系统的化学和工艺条件。“界面相工程”首先是要在原子/分子级水平上来研究界面/界面相,从而使通过广泛的化学知识来控制界面/界面相的结构成为可能。最

后通过对结构与性能之间的关系的研究使复合材料的性能达到预期的要求。

日本丰田公司采用了一系列的新方法研究了界面/界面相的变形和复合材料的疲劳性能之间的关系。这些方法包括:在实际受载状态下用扫描电镜观察界面相的微观失效过程(界面相基体材料的微孔洞、剪切屈服以及裂纹的形成);用声发射法探测界面裂纹;用热-声发射法测量由热应力引起的界面相的变形行为;用高能动态粘弹性仪研究复合材料在高水平动载荷下的粘弹性行为。研究表明,纤维周围界面相内的微孔洞、剪切屈服和微裂纹对于复合材料的强化机制起着重要作用,材料的疲劳耐久性与界面相的行为密切相关。

5. 金属间化合物

由于钛铝金属间化合物具有低密度、高刚度和高温的特点,Ti₃Al被认为不久将可能用于所有的新的军用发动机。英国伯明翰大学Bowen等研究了Ti₃Al断裂的微观机理,发现在室温下为穿晶脆断。随着试验温度的增加,失效模式变成微孔洞的连接,从而导致在500℃以上的断裂韧度的明显上升。他们还研究了TiAl材料在室温和500℃及800℃高温下氧含量对断裂韧度的影响,发现这种影响十分明显:随着含氧量的降低,断裂韧度升高,1800ppm比2300ppm的要高出50%。断口分析表明,在500℃以下时,基本上属穿晶断裂。

TiAl在力学性能方面存在着一般金属间化合物的普遍出现的低延性,低韧和较差的加工性。日本Maeda等人研究了加钼的TiAl微观结构对力学性能的影响,比较了3种典型的微观结构,即片状、粗等轴和细等轴的拉伸和持久强度(温度为1073K),结果表明力学性能对微观结构有极大的依赖性。这意味着要得到一个能够兼顾室温延性和高温强度的那种优越的微观结构将是相当困难的。

6. 新材料中的力学分析计算与理论模型

新材料的发展给力学工作者提出了许多全新的力学挑战。本届大会上可以看到许多这方面的工作。限于篇幅,这里只能给出几个有代表性的研究。我国清华大学黄克智教授在题为“相变塑性及其在陶瓷增韧中的应用”报告中,基于细观力学和热力学原理提出了相变塑性的本构模型。该模型同时考虑了相变中膨胀和剪切两个方面,能够描述结构陶瓷在不同温度下的相变过程中的塑性、伪弹性和形状记忆行为,所得到的理论预测结果与现有的实验值符合很好。作者们还利用这个模型满意地预测了陶瓷材料的增韧效果。

美国布朗大学Mchugh、Asaro和Shih等用计算微观力学研究金属基复合材料(SiC颗粒增强的Al-3wt%Cu)。他们发展的有限元模型能对材料的微观结构(基体单个晶粒和强化粒子)进行详细的描述。利用这个模型,作者们深入研究了微观结构和性能,即变形行为以及强化和失效机理的发展。

美国Tulane大学的Rubinstein提出了基于离散纤维

增强的脆性基体复合材料增韧解析模型。该模型能考虑离散的纤维分布,并能在微观尺度上分析裂纹扩展参量。它的裂纹扩展阻力的机制是建立在“桥联区”的基础上的(即开裂的基体材料被裂纹尖端后部尚未断裂的离散纤维所桥联)。文中考虑了纤维拔出时位移与力的两种关系:线性关系和平方关系,得到了桥联区的封闭解。

四、几点启示

ICM6的600多篇论文覆盖了近20个研究方向,以上的简单评述无疑将是挂一漏万式的。会议文集所包含的丰富内容有待结合实际去消化吸收。从大的方面看,我们觉得大会给我们留下了不少有益的启示,主要是:

1. 在材料，特别是新型材料的研究与发展中必须对其力学性能始终给予高度的重视。对于结构材料来说，力学性能包括使用条件下的性能，既是新材料研制的出发点、也是它的归宿。值得指出的是，现代航空结构对材料的要求已大大超出了传统的静强度和高温强度的范围，耐久性、寿命（包括无裂纹，小裂纹，长裂纹）和损伤容限等新的性能已经成为评价飞机和发动机结构材料使用性能的重要指标。这方面在 ICM6 会议中有许多文章。这些新的情况在材料研究的初期就应该得到足够的重视，否则将可能造成研制周期的延长或经济上的浪费。

2. 必须重视新材料的试验和评价技术。与现有的金属材料相比,绝大多数新材料呈现着极为复杂的力学行为,例如强烈的各向异性,纤维/颗粒与基体的桥联,界面失效,裂纹偏斜和拐折等等。而由于新材料一般都很昂贵,试样尺寸和载荷都受到限制。这些将给材料的力学性能试验带来一系列的新问题。因此要保证新材料研究的顺利进行,必须不失时机地建立起一套先进的材料力学性能试验与评价技术。

3. 应该强调材料与力学工作者之间的交流和学科交叉。力学工作者更深地介入新材料的研究与发展,一方面可以为新材料性能的改进(例如增韧,强化)等探索理论模型,研究主要参数对性能的影响;另一方面可以为材料的力学性能的试验评价与表征关联,失效机制的宏观分析以及材料与结构之间力学行为的转化和预测作定量的分析。这些工作无疑应成为新材料发展中的一个重要组成部分。

参考文献

Mechanical Behaviour of Materials — VI, Proceedings of the Sixth International Conference, Kyoto, Japan, 29 July — 2 August, 1991, Eds. M. Jono and T. Inoue, Pergamon Press.

日将开发智能构件材料

日本科技厅最近制定的一项5年计划,从1992年开始的5年中,日本金属材料技术研究所和无机材料研究所将共同开发智能构件材料。

构件材料如金属等都会因低周或高周疲劳而产生龟裂,使材料受到损坏,而影响寿命和使用安全。智能构件材料是一种能够自动修复龟裂的材料。

这个计划的设想是,在金属物质中存在有50nm的空隙,如果将控制物质填入其中,当发生龟裂时就会发出声波警报,或者自动促进氧化反应,以修复龟裂部分。

金属材料研究所还将开发探测龟裂状况的纳米级的检测技术。

无机材料研究所准备利用氧化锆所具有的对压力和热反应敏感的性质, 开发陶瓷系统的智能构件材料。

同时,还将分析物质龟裂部分的原子排列情况等,以搞清龟裂的发展过程。

如果智能构件材料一旦研制成功,这将是材料科学上的一个重大转折点,使材料能够大大地延长使用寿命,以及机械制品的使用安全,对整个机械工业和其它行业就会大大节约各种维修和维护作业的人力。特别是对航空航天工业生产的飞行器的飞行安全,将有划时代的实际意义。

(徐忠杰)

✕ ✕ ✕ ✕ ✕ ✕ ✕ ✕ ✕ ✕ ✕ ✕ ✕ ✕ ✕ ✕ ✕ ✕ ✕ ✕

单晶涡轮叶片制造新工艺

德国 SULZER—MTU 铸造技术有限公司现已研制出一种新的工艺方法,能用来代替燃气涡轮单晶叶片的制造工艺,这种新的工艺是以铸型积分参数来控制凝固面所需的定向热流的产生,其应用比借助外部加热系统的一般方法容易得多。该工艺的特点在于它不仅经济效益较高,而且在复杂部件的制造上具有很大的灵活性,其结构和性能均优于目前其它单晶叶片。

通过对大量部件的制造证明此工艺具有广泛的应用范围。因此，欧洲共同体将进一步发展这种新工艺作为 EURAMBRITE 计划的一部分。欧洲两大铸造工厂，即德国的 Thyssen Guss AG 和瑞士的 Pecicast SA 已经签署合作协议，目前两家工厂正着手准备此工艺的试验和批生产。喷气发动机的中间压力涡轮上的定向凝固导向叶片，以及直升飞机推进器的高压力涡轮上的形状复杂的叶片和单晶转子叶片，均已被选定采用该工艺。

(钱军)