

• 超声传感器性能描述 包括在波与缺陷相互作用中, 以及在输入(输出)电压-时间过程与产生的(弥散的)波形之间的关系中, 有限孔口的影响。

• 声学显微镜的研制 应力波透镜的设计和有关聚焦的超声波穿过一个流体层的传播问题的研究。

• 残余应力的超声测定 增进对非均匀介质中的非均匀应力场映象的了解; 第三阶弹性模量的测量。

• 声发射 在硬的脆性夹杂物处, 对裂纹成核的检测, 以及对现有裂纹扩展的检测。

• 地震工程 改进对穿过层状多孔、弹性介质的波的波源和传播的模拟; 结构物-介质的相互作用; 软的非均匀层对局部的地运动幅值的影响。

• 在高加载率下的力学特性 在高应变率 and 高压下, 流动条件和破坏条件的测定; 对形成剪切带的临界条件和对动态断裂临界条件的模拟; 双晶、相变以及多个缺陷的相互影响。

• 三维问题的计算 发展在超巨型计算机上求解瞬态应力波传播问题的有效算法。

• 能量沉积而产生的应力波 对于由于强激光与固体介质相互作用而诱发的应力波, 进行理论研究和实验研究; 生产中的应用。

7.4 参考书目

- Achenback, J. D. (1973). *Wave propagation in elastic solids*. Elsevier, New York.
- Aki, K. and Richards, P. (1980). *Quantitative seismology - theory and methods*. Freeman, San Francisco.
- Auld, B. A. (1973). *Acoustic fields and waves in solids*. Wiley, New York.
- Datta, S. K. (Ed) (1984). *Earthquake source modeling, ground motion, and structural response*. ASME, New York.
- Davison, L. and Graham, R. A. (1979). Shock compression of solids. *Phys Rep (Rev Sect Phys Lett)* 55, 257-379.
- Harding, J. (Ed) (1984). *The mechanical properties of materials at high rates of strain*. Proc of third Oxford conf. Inst of Phys, Oxford.
- Johnson, G. C. (Ed) (1984). *Wave propagation in inhomogeneous media and ultrasonic nondestructive evaluation*. ASME, New York.
- Knauss, G., Ravichandrar, K. and Rosakis, A. J. (Eds) (1983). *Dynamic fracture*. Proc of workshop, Caltech.
- Mesall, J. and Weiss, V. (Eds) (1983). *Material behavior under high stress and ultrahigh loading rates*. Sagamore Army mat conf proc n 29, Plenum, New York.
- Pao, Y. H. (1983). Elastic waves in solids. *J Appl Mech* 50 (50th anniversary issue), 1152-1164.

孟 珊译自: *Appl. Mech. Rev.*, **38**, 10 (1985): 1276—1278.

12. 用于高温和有害环境的结构系统

首席作者 F. A. Leckie

(伊利诺斯大学理论与应用力学系)

R. H. Gallagher, R. B. Haber, M. Klein, D. L. Marriott, D. H. Pai 和 M. J. Salkind 对初稿提出了审阅意见。

提要 对有害环境中高温下工作的承载结构系统的需求, 已经导致新的金属合金和非金属材料的发展。因为工作条件恶劣, 材料常经受严峻的加载环境和腐蚀环境, 所以只能设计有限寿命的结构系统。为了完成有效的设计, 必须了解材料的物理和力学性质, 以及这些性质与系统的运转性能有何关系。不但讨论了在寻求更先进和更经济的性能时必然提出的基础问题和计算问题, 而且讨论了与此有关的一系列问题。

12.1 引言

承载结构系统的新问题，一般可能与提高工作条件的需求有关，与工作寿命的估计和时效系统的寿命延长有关，以及与大型和复杂系统的设计过程有关。这些问题由以下这些推动力所引起：

a. 提高性能 提高工作温度可以使效率提高，而减轻重量可以减少动力需求和产生动力学上更灵敏的系统。

b. 延长寿命 如果现有系统的寿命可以延长而不需昂贵的检查和改进，那么就可以期望大大节省投资。

c. 避免破坏 必须避免昂贵的修理和维护，以及保证公众的安全。

结构系统常见于许多领域，包括近海结构，土木工程结构，动力设备，飞机和宇航系统等。尽管现在讨论的许多问题具有共性，但本文主要涉及通常与机械工程有关的结构系统。

运转性能的改善，（通常）是提高工作温度和减轻重量的结果。要求提高运转性能，引起了材料性质不断的改善，反过来又对固体力学产生了新的要求，因为发展了新的材料和出现了新的破坏机理。预测运转性能、可靠性和结构系统寿命的能力的基本因素，是描述材料行为的本构方程的系统表述。除了必须描述材料受应力时的变形外，还需描述材料内部变化过程的形成和发展，特别在预报部件寿命的情况下这是重要的。只具有描述简单的单轴应力状态的能力还是不够的，研究工作必须包括多轴应力状态的影响。例如，改善部件（例如在主方向上受载的透平叶片）运转性能的一种方法，是利用材料性能呈现方向性的材料。描述这种高度各向异性材料行为的本构方程基本上还没有，如同没有相应的基础实验结果一样。尽管金属的单轴行为已经相当充分地了解了，但对实践中产生的多轴应力状态来说却不是这样。同样，用于推导本构方程的方法仍然没有得到大家的承认。需要进一步努力去研究本构方程的基本提法，以及需要与受均匀应力的试件相对照去判断这些方程在预报部件行为中的成功程度。当不同的材料放在一起以便通过它们在一起协调工作而提供一系列希望得到的性能时，问题就进一步复杂化了。例如，部件受到超过1000℃高温的部分可以由具有耐高温涂层的金属构成。不同材料的这样复合引起了一些问题。尽管金属可以提供强度，而涂层能防护热腐蚀，但金属和涂层两者之间的界面连接，必须是充分牢固，能承受由于热膨胀系数不协调而产生的热应力。如果要使所得到的部件能够经受得起载荷和温度随时间的复杂变化的作用，那就必须了解这种表面的界面力学。因而建立合适的本构方程，对本文中提出的许多论题来说是一个基础性的普遍问题。

12.2 高温设计

要求提高热效率和加工效率，意味着必须不断提高工作温度。（例如，在天然气工业范围内，需要有一些结构部件在1500℃左右的温度下工作。）在所有温度水平上都料想到会有这种效果，因此，目前蒸汽发电设备的600℃温度将提高到现在用于飞机发动机所达到的900℃水平。然而，部件将是更大的，将工作几万小时而不是几千小时，并且用蒸汽运行，而蒸汽是个腐蚀环境。在温度超过熔化温度的1/3时，受到应力的材料将随时间连续变形和损坏。因此，高温部件被设计成只工作有限的寿命。适用于高温的力学，必须能描述材料变形和破坏两者的时间相关行为。为了满足在极高温下工作的条件，正在发展新的陶瓷材料，并且因为这些材料具有与金属极不相同的性质，所以可能必须用尚待研究的力学成果来发展新的设计方法。

现在已经相当好地了解了用来描述时间相关的单轴变形所需要的本构方程。然而，有三个实质上的缺点：

1. 目前提出的本构方程通常都很复杂，并且在设计的开始阶段太难掌握。如此的复杂性往往是一种对其无能为力的情况。所以需要将结构系统及载荷与适合于问题要求的本构方程相匹配。已经阐明，特别在剧烈载荷情况下，如果是正确地匹配了，那就有相当大的可能去减少材料试验的数量，从而节省时间和资金。

2. 金属行为的研究基本上限于单轴应力状态，对模拟实际部件中产生真实三维应力状态的情况，几乎没有进行什么研究。

3. 一些新的金属依靠性质上的强方向性变化，显示出改善的性质。急切需要对这此方向性性质有一个好的描述，就象急切需要实验结果一样。

由于经济原因，需要减少部件实际寿命和设计寿命之间的差距。如果对引起破坏的微观过程的发展有更好的了解，那就可能有助于实现上面的工作。用这种办法，就有可能满足发展合理的寿命预测技术的需要，这种技术反映材料内部偶然发生的事情。在值得注意的项目中可能有以下两个：

1. 多轴应力状态对损伤（其中包括蠕变破坏、蠕变/疲劳相互作用）过程发展的影响，腐蚀破坏的作用，以便可以估计应力与化学作用的耦合作用。

2. 在有预裂纹的结构中损伤的发展。这可能包括蠕变裂纹扩展、蠕变/疲劳对起裂和裂纹扩展两者的影响。

损伤率，特别是热腐蚀的损伤率，随温度的升高而急速增加，并且随着温度的升高金属的利用变得越来越困难。所以，如果要使提高性能成为可能，就必须考虑具有更高熔化温度的材料。陶瓷是一种具有这种可能性的材料。如果陶瓷被用来承受主要载荷，那么它们的脆性就变成一个先天的设计弱点。为了改进韧性，正在利用由相变效应和纤维增强导致的韧化机理。然而，大家知道，破坏过程还是在高温下工作的陶瓷中产生，所以仍然要建立有助于设计这类部件的相应的力学。很可能在一段时间内主要的妥善处理办法，是采用由金属（用于承载）和陶瓷涂层（用于防护热腐蚀）组成的复合材料。这种结合可能使工作温度增加 150°C 。然而在金属/陶瓷的界面处又出现了困难，在这里，热失配产生了内应力状态，这种内应力特别在热循环加载条件下可能引起破坏。

12.3 时效系统的寿命估计和延长寿命

通过在恶劣条件下操作动力设备，知道了各种破坏形式在设备整个寿命中不断出现。一般说来，因为设计过程中加了安全系数，所以检查一般显示出，在到了设计寿命时设备还是良好的。然而自然会问，设备工作寿命可否安全地延长。如果可以安全地延长，那就可以有巨大的经济意义。接着的问题是测量设备的损坏情况，预报损伤的未来发展，从而提供一个精确的寿命预报。为了进行这些工作，必须了解破坏机理，破坏的发展速率和破坏对部件运转性能的影响。下面列举这个领域中现代的部分代表性问题。

1. 残余应力测定 残余应力已被证明是部件破坏的主要原因。用残余应力无损检测法（它以恰当的分析作后盾）来解决工业中日常面临的某些问题，可能要走一段很长的路。

2. 应力加速腐蚀和腐蚀疲劳 这问题与第1条有关。总的说来，了解物理/化学的耦合问题，对于了解应力腐蚀和腐蚀疲劳是必须的。

3. 无损检测 波传播知识对于了解象超声波检验这样的技术是必不可少的。在这个工业上竭力延长设备寿命和节省资源的时代, 无损检测 (NDE) 正在成为一种更重要的工具。在本领域内技术发展的动态不仅包括超声检验, 而且包括 X 线和涡流检验。就物理损伤而论, 无损检测结果的解释是一个紧迫的问题。

4. 熔焊和固化问题 构件和机器部件的成功结构, 要求良好的熔焊, 因为许多破坏看来都发生在熔焊件中。从力学观点来看, 要求改善对熔焊过程的了解。

12.4 降低费用的一些尝试的效果

长期以来 Cr-Mo 型低合金钢被使用在高温下工作的部件结构中, 目前的许多事实, 包括部件尺寸增大和来自外国的高强度钢的挑战, 已经导致考虑在淬火、正火和回火状态下利用这些钢, 这种状态的钢组织中主要是贝氏体。通过热处理达到屈服强度和极限强度的改善是相当可观的, 如果有可能通过把这种强度的增加量完全转换成许可应力的增加值来利用这种效益, 那就相当于可能节省约 30% 的材料。这不仅带来费用上的直接节约, 而且可以使更大比例的制造工作在有较多控制的车间内进行, 从而有了得到更高可靠性的前景。

然而, 与具有较高强度的材料有共同之处, 这些热处理的合金钢由于循环加载而遭受相当大的强度损失。例如, 在相当于疲劳寿命 10—20% 的循环之后, 交变塑性变形对 2.25Cr 1Mo 钢的影响是降低了循环应力幅值约 30%。当循环继续时, 观察到类似的降低。如果为设计目的调整这种钢的许用应力值, 则这种循环软化效应实际上抵消了原来从热处理材料得到的任何好处, 因为循环强度与同种材料的正火状态的强度几乎没有什么不同。除了对短期性能 (例如屈服强度) 的影响之外, 已观察到了间歇的应力交变 (不一定在非弹性范围内) 还对蠕变变形性能有不利影响, 在某些情况下寿命降低达几个数量级。从压力容器设计的观点来看, 这意味着时间相关性能同样可以有相当大的降低。最终可以观察到, 在循环载荷下在蠕变范围内贝氏体低合金钢表现出严重的寿命降低。如同需要确定结构条件 (在此结构条件下软化特性导致过早破坏) 准则一样, 在循环载荷状态下, 仍需发展不断地软化的材料的力学。

12.5 大型和复杂系统的设计

在实践中所产生的许多破坏, 是由于疏忽而违犯了非常实在的物理学和力学原理所造成的。尽管“专家”系统已经发展到形成了建立在规律基础上的知识, 但是, 能够利用结构力学知识宝库的计算机系统还几乎不存在。质量保证技术是用来保证制造过程在设计完成之后进行。质量保证技术并不能找出概念性设计中的缺陷, 而这些缺陷是可能在设计的整个工作寿命中经常出现的。

当大型系统的设计还是个合同时, 在设计过程能完成之前常常必须做出一些决断。因此, 早期的决断必须不引起在设计中的前后矛盾, 这些矛盾暴露在后面的更详细的设计阶段中。经验表明, 这类错误几乎总是难于纠正和纠正费用昂贵的。力学的近似方法为发展适应于早期设计阶段的快速方法提供了可靠的基础。尽管这些方法的作用在计算机时代前已有了很好的评价, 但仍需研究它们的适用性和研究把它们编制到与分析系统不同的计算机设计中去。因而需要把严格的力学领域扩大到结构系统的设计中去。对力学的这种要求, 很可能因为可获得许多新材料而变得更加明显。

实际上, 现在存在如下的可能性, 这就是材料本身的设计成为总结构系统设计中的基本

组成部分。需要发展严格的“范围外”¹⁾的方法，并且这些方法将同目前主要应用着的分析方法有效地结合。

12.6 计算技术和分析方法

虽然有限元方法原则上可以用来确定复杂系统（受任何形式的力学载荷或热载荷作用的系统）的应力和应变历史，但实际情况却有点不是这样。首先，通常使用的本构方程仅能描述相当简单的材料行为。能够描述材料行为的较复杂问题的那些本构方程，却极易得出棘手的方程组。这些方程组引入了数值不稳定性，要想回避这些数值不稳定性，需要进行繁重和昂贵的计算。因此，一步一步小心谨慎地进行计算的那些一般计算方法，除了对于最简单型式的载荷情形外，都可能证明是不切实际的。试图考虑变力学载荷和变热载荷的影响，可能导致计算工作量大得不能获得成功的数值计算困难。当本构方程考虑损伤的影响时也可观察到类似的困难。这种计算日趋重要，因为它们不但有希望预测变形的累积情况，而且也有希望合理地预测部件的寿命。因而迫切需要发展数值方法，这些数值方法有希望提供稳定的行为，并且非常有力地避免目前方法所要求的精心照料。

即使这样有力的方法是现成的，在作出关键性的和有影响的决定时，这些方法在早期设计阶段不大可能是有用的。这时，举世公认但有一定缺陷的简化计算可以证明是很有用的，特别当涉及容易得到的那些材料特性的时候。这样的方法的一个例子是用于蠕变变形和破坏设计的“参考应力”方法，并且这种方法适用于常载荷和循环载荷二者。对于受相当大交变塑性应变的部件，还需建立这种简化和受限制（bounding）的方法，而这种塑性应变又可能是硬化（象不锈钢 316 中）或软化（象低合金 Cr-Mo 钢中）的原因。在研究这类问题时，很可能要求考虑材料行为和结构系统的综合的总影响。事实上，如果我们用以前的经验来指导，那就极可能许多计算方法都将是现成的。当设计从大量初始试算进展到成熟的逐步起确定作用的分析时，这些计算方法中的每一方法将适合于作出决断过程的不同阶段。

12.7 非金属系统

虽然现代的分析方法和数值方法主要是对金属进行设计的结果，但用于机器部件的非金属材料，其日益增长的利用和重要性，意味着必须对发展适用于新材料的设计力学给予极大的注意。复合材料的性质和应用，已是长期深入细致研究的课题。复合材料方面的研究良机在本报告的其他文章中谈及。在本文中，我们提到三种材料，它们是适用于结构的代表性材料，正在被大量应用，并且应用数量不断增加。

12.7.1 陶瓷 提高工作温度可以改善大多数燃烧系统和热回收系统的热效率。更高的操作温度必然对用在这些系统中的材料提出更苛刻的要求。因为提高了设计工作温度，达到了金属合金的可用极限，所以必须更多地使用陶瓷材料。陶瓷的高强度和抗腐蚀性，在高温燃烧和余热回收中有着巨大的优越性。然而，在廉价的和可靠的陶瓷可以使用于结构系统之前，要求对基础了解有进一步的发展和更高的水平。

例如在铝加工工业中，现代技术受到苛刻废气环境的强烈限制。在一般熔炉中；1100—1300℃的废气挟带了含硫、氯和氟的蒸气以及碱金属类硫酸盐、卤化物和铝氧化物粒子等组分。

1) 指老的结构系统设计范围外。——译者。

传热和热冲击,陶瓷/陶瓷和陶瓷/金属连接,脆化材料设计,熔融金属的耐蚀性,以及各种各样的烟气,是重要的有关问题。

早就注意到目前正在发展的燃气轮机以 900°C 的气体入口温度工作,并且它只采用金属部件。如果可以保证充分的可靠性,那么将可以考虑通过更高工作温度和采用陶瓷来提高效率。耐热涂层的发展将很可能是向提高工作温度迈出的第一步。为这种应用目的,陶瓷必须具有极好的耐热冲击性和必须在氧化、腐蚀、高速和高温气体中是稳定的。

计划的 Stirling 发动机将使用镍合金或先进的铁基合金。加热器头部、回热器和预热器都是主要部件,这些部件的工作寿命受工作环境的限制。特别是加热器头部必须在 700°C 温度下经受住高达 15.5 MPa (800 psi)的压力和长达10000小时以上时间的考验。如果陶瓷的蠕变寿命得到改善,则加热器头部将考虑采用陶瓷材料。

碳酸盐燃料电池在约 650°C 下工作,采用陶瓷作阴极、基体材料和各种热交换器。诸如阴极溶解、极化、腐蚀和热疲劳之类的材料问题,将用陶瓷作为替代材料或作为防护涂层来解决。固体氧化物燃料电池在 $930\text{--}1100^{\circ}\text{C}$ 之间工作,它们经受着热循环,因而将几乎完全由陶瓷材料来组成。

陶瓷固有的低韧性是一个弱点,但是当诸如相变和纤维增强这样的韧化效应变得更有效时,就可克服这个弱点。然而现在的改善还不足以避免建立在脆性行为基础上的设计。除了改善陶瓷的韧性之外,还需要发展复合材料的结构系统。这些复合材料将产生具有各种性能的部件,这些性能都是满足工作所要求的。

12.7.2 玻璃增强纤维 许多结构系统正在用这种材料来构造,这种类型材料的优点是容易构造结构系统和不受化学腐蚀。因而现在它被用于许多管子和容器。但一般说来,这种应用局限于结构问题是次要问题时的低应力状态。然而,由于这种材料和结构方法的不可靠性以及由于长期工作的损坏,增加工作要求是达不到的。改善可靠性的有益结果将是增加载荷和应力。因而需要去了解材料破坏的模式,以及在构造过程中如何控制这些材料的破坏模式。同样地,需要了解时间相关破坏机理,而且还需要把这种了解发展成可以应用的力学理论。

12.7.3 混凝土 预应力增强混凝土不仅用于土木工程结构系统,而且用于机械工程结构系统。虽然在土木工程系统中出现裂纹时问题可能不太严重,但机械防护外壳系统中具有分布裂纹,却可能导致危险物质的泄漏。因而需要研究混凝土和脆性材料的连续介质损伤力学,特别是在高热血力学载荷和高内压载荷的情况下。

12.8 需要开展研究项目一览

- 本构方程 对于高温材料,包括具有强方向性性质的那些材料。材料软化对结构运转性能的影响也是普遍问题。

- 微裂纹力学 预测发裂纹成核和扩展的能力,将有助于系统表述安全寿命的预报技术和奠定无损检测的基础。

- 多轴应力状态 为了设计出高效的结构,必须了解在实际中产生的那些有代表性的多轴应力状态的影响。

- 寿命估计 必须发展建立在力学和材料性能基础上的合理寿命预报方法。

(下转第 266 页)

表 3 塑性变形类模型的优缺点一览表

类 型	优 点	缺 点
塑性变形理论	①简单 ②允许滞回性状	①在中性或接近中性加载时发生连续性问题 ②除卸载情况外, 性状与路径无关
变模量模型	①简单 ②数据能很好拟合 ③允许滞回性状 ④容易拟合 ⑤适用于有限元法计算	①在中性或接近中性加载时发生连续性问题

表 4 塑性类模型优缺点一览表

类 型	优 点	缺 点
Drucker-Prager 类纯塑性模型	①拟合简易 ②容易应用 ③适当选取参数后能与 Mohr-Coulomb 准则吻合 ④备有计算机程序 ⑤能用极限分析技术 ⑥满足唯一性要求(相适应流动法则)	①过高估计了屈服时的剪胀性 ②在破坏面内不能产生滞回性 ③不能推算不排水时低于破坏的循环剪切加载产生的孔隙水压力
帽子类硬化模型	①满足稳定性、唯一性及连续性等所有理论上的要求 ②能适当控制塑性剪胀性 ③静水压力加载和卸载循环过程中能产生滞回压密	①为拟合数据需进行试算 ②相当复杂 ③不能推算不排水时低于破坏的循环剪切加载所产生的孔隙水压力(当使用帽子运动硬化模型时就可以适当描述)

(上接第 260 页)

- 应力加速腐蚀 力学/化学问题的耦合在今天的部件中是一个重要的破坏机理。
- 设计力学的发展 需要发展和利用有助于支持早期“范围外”设计阶段的变分法和定界方法。在这些方法中应特别努力将总系统中材料的选择和材料设计包括在内。
- 计算技术 要求可靠的计算技术, 它们能避免数值不稳定性, 并能处理发生在实践中的热载荷和力学载荷的变化。
- 非金属系统 需要有脆性材料的设计方法, 以及需要研究材料的组合和分配。这种组合和分配将提高结构系统的运转性能和工作范围。

程屏芬译自: *Appl. Mech. Rev.*, 38, 10 (1985); 1290—1293.