

本构关系理论及应用的 新 进 展

——第三届材料本构关系短期讲座及学术讨论会文集

重庆大学工程力学研究所
材料本构理论及应用研究室

1988年3月 重庆

前言

从一九八六年七月在重庆举行第一届材料本构关系短十分艰苦,为了能长期坚持讲座与会议前后不过二十个月,在同一地方连续举行三届同详细地分析了国际上本构关系的这一事实,从一个侧面反映了我国不少人对材料本构关系及其工程应用的研究正引起越来越大的重视。当然由于我国起步较晚而该项研究又十分艰苦,为了能长期坚持下去确有不断提高认识的必要。为此在本专集的导论中比较详细地分析了国际上本构关系研究热潮的深刻工程应用背景及其在国内产业界引起的初步反响,并以八个力学分支为例探讨了发展材料本构关系对力学及工程科学的意义。贯穿其中的红线是强调现代本构关系的研究与一、二十年前那种纯理论的基础研究的不同点,即它与有关生产技术和应用科学的日益密切的联系,而这正是近年来国际上不少大公司和政府机构也对这类基础研究大力资助,并使之成为了国际力学界一个十分活跃的前沿研究领域的原因所在,也是我们在卷入到那些高深的理论中或甚至使人模糊不清的无休止的争论中时,需要保持清醒头脑的地方。

导论中在我们对材料本构关系这一术语作了明确定义之后,说明了“这种取决于物质内部组织构造的固有关系数学表达式(本构方程)是研究各种变形体力学问题的基本根据”,以及“细观机制与宏观表象相结合的研究,已能考虑不同量级大小的损伤对材料本构关系的影响,从而展示出有可能用含损伤等内部参量的本构方程及相关的损伤失效准则统一描述非弹性变形-局部损伤失效及其演化-宏观韧性破坏这一全过程...”。这种把本构关系(方程)与材料的组织构造(如原子分子结构、相结构、界面结构、位错结构和微空穴与微裂纹的分布结构)紧密结合起来的提法,也许有助于我们深入到材料细观结构上去建立细观力学模型,以图材料的改性和强度、刚度与韧性的细观结构设计提供相关的分析方法。正是在这种思想的指导下,我们通过空心微珠与树脂基界面及纤维作用的有关力学分析,研制了微珠与纤维混合增强复合材料,使强度与刚度得到了成十倍的提高,并已用来试制板簧、纺梭等另件,该工作与张培源等同志完成的有关空心微珠对复合材料本构关系的影响等文将在会议上汇报,其目的是希望这种力学方法在研制新材料中应用的尝试能起到一种抛砖引玉的作用。

本届讲座与会议除保留了“固体力学前沿领域生长点信息研究”这一系列报告外,通过九个特邀报告广泛而深入地介绍了多方面有成效的研究工作。从段祝平同志的“分布缺陷的连续统理论”到孙训方先生多年来一直思索的局部方法,从郑长卿同志的“韧性断裂细观过)紧密结合起来的提法,也许于大变形本构方程及其在损伤力学与断裂力学中的应用的以图材料的改性和强度、刚构的高速撞击效应”到周光泉同志关于热粘

塑性模型与流体弹塑性模型的研究,从王武林同志的“岩土动力学特性及其本构关系”和刘西拉同志的“钢筋混凝土本构模型”到波兰 Jan Rychlewski 院士各向异性极限关系新描述的理论,展现在我们面前的是非线性连续介质力学那丰富多姿的概貌,这是当人们局限于狭窄的力学分支壁垒中时难以洞悉的。这种既有中心研究内容又涉及多学科交缘领域的会议,是与那种专门化强的会议相辅相成的,尽管参加这种会议可能构成对与会者知识广度与深度的一个挑战,但其中也许正孕育着与会者与读者某种创造性工作的萌芽。

近年来我国青年力学工作者的学术活动日趋活跃,这是十分可喜的现象。在这次会议上我们试着组织了不同年级的博士生论文工作的学术交流,其中有即将进行博士论文答辩的张进敏与杨光松同志,也有刚入学半年的两位博士生。我们希望这将有助于年轻同志在活跃的学术气氛中迅速成长与脱颖而出。

国际上一些有名的大学和系(如美国加州理工学院和伊利诺大学理论与应用力学系),不但学术活动十分频繁而且每年公布其研究报告,世界各地都可免费向其索取。在国内,国家计委、教委与科学院正在组织与建立开放实验室与重点学科点,可以期望这些室与点的开放性研究工作,将会对繁荣我国的学术研究和技术发展起重要的促进作用。我们虽然由于人力与财力的限制,一时要做到每年公布研究报告尚有困难。但为了对建立一种开放性的而不是孤立性的和互相封锁的学术研究气氛有所裨益,在本专集或会议中介绍了十篇我校工程力学研究所有关材料本构关系的研究工作,希望这将有助于促进兄弟系(所、室)与博士点间的学术交流与相互了解。

在过去两年内我们接待了国内访问学者,举办了研讨班,并三次承担了与四川省力学学会固体力学学科组一起举办材料本构关系短期讲座与学术讨论会的工作,虽然实际表明这是行之有效的,但在新的形势下确有进一步提高与深化的必要。我们认为今后除了就某些专题举办各种类型的小型讨论会和双边与多边的学术交流会外,最重要的是积极筹备不同类型的国际学术会议,使我国这支年轻的本构关系队伍能尽早与国际上知名学者直接接触,以便使研究工作建筑在较高的起点上。尽管我们的这一想法从1985年出版重庆大学学报“材料本构关系及其应用”专辑算起已经三年了,但要实现这一召开国际会议的愿望还要作很多艰苦细致的工作。我们当努力与兄弟系(所)和力学学会各级组织密切配合,在我国老一辈力学家的指导下为实现这一愿望继续作出应有的贡献。

最后,谢谢大家的光临,并期望着十八个月后我们能在国际或国内会议上再次相聚在这美丽的山城。

范镜泓

1988年2月24日

目 录

前言	1
导论—从新的高度和广度来认识研究材料本构关系的重要性	3
重庆大学材料本构理论及应用研究室 范镜泓教授	
第一部分 固体力学前沿领域生长点信息的研究	11
1 损伤力学的新进展 (范镜泓)	12
2 延性两相合金变形模型的研究进展 (马鸣图等)	17
3 形状记忆材料的热力学与统计力学理论 (高芝晖等)	39
4 高温材料本构关系的综合性评论 (范镜泓等)	44
5 Nemat-Nasser大变形、细观力学理论及其在金属塑性及岩土中之应用 (范镜泓)	57
第二部分 特邀报告及部分学术交流论文	60
1 损伤力学与局部方法 (提纲) (西南交通大学孙训方教授)	61
2 大变形本构方程及变形几何理论 (中国矿业学院北京研究生部陈至达教授)	63
3 大变形力学理论及非线性效应讲座补充教材 (中国矿业学院北京研究生部 陈至达教授)	71
4 钢筋混凝土本构模型的研究 (清华大学刘西拉教授)	98
5 临界空穴扩张比判据及其应用 (西北工业大学郑长卿教授等)	110
6 粘塑性本构模型简介 (中国科技大学周光泉教授)	121
7 各向异性极限准则的新描述 (波兰 Jan Rychlewski)	133
8 岩土动力学特性及其本构关系 (中科院武汉岩土所王武林高级工程师)	134
9 分布缺陷连续统理论及其在本构方程研究中之应用 (中科院力学研究所 段祝平副研究员)	135
10 低浓度短纤维填充聚合物粘性流体的本构模型 (重庆合成化工厂 周持兴付总工程师)	136
11 金属材料空穴型损伤表征参数的探讨 (西北工业大学马若涓等)	140
12 几种陶瓷材料弹性模量测量方法之比较 (中国建材科学研究院马眷荣等)	151
13 辉长岩短棒试件中的断裂过程区 (中南工业大学易小平)	155
14 结构的高速撞击效应 (核工业部九院陈裕泽付研究员)	156

第三部分 1987年度本构关系研究新进展(重庆大学工程力学研究所)..... 157

- 1 一种计及基体开裂损伤的复合材料层板的非线性本构关系 (张俊乾 范镜泓) 158
- 2 一种混凝土的内时方程及其对复杂路径和剪胀效应的分析 (赵杰 范镜泓) 164
- 3 包含相变的非等温内时本构方程及其在淬火应力分析中应用
(刘琳娜 范镜泓) 172
- 4 特大增量步弹塑性场数值分析之原理及算法探析 (张晶 范镜泓)..... 177
- 5 柱体撞击刚靶的弹塑性应力分析 (刘相臣 杨乐汴)..... 182
- 6 空心微珠复合材料的弹性、蠕变及相界面损伤 (张培源 严波)..... 186
- 7 新的大变形内时本构描述及其场分析 (曾祥国 高芝晖 范镜泓)..... 195
- 8 土的内时本构方程及其与帽盖模型的关系 (王建国 范镜泓)..... 202
- 9 粘塑性内时本构关系及率敏感强化函数 (唐质然 范镜泓)..... 211
- 10 微珠增强及微珠纤维混合增强复合材料力学性能分析和机理探讨
(高芝晖 范镜泓 张俊乾 郭少华)..... 219

第四部分 博士论文研究进展及信息交流..... 220

- 1 基于参考、中间和当前构形上的塑性力学构造 张进敏 (上海应用数学力学研究所固体力学博士点)..... 221
- 2 工程材料的非比例循环本构行为研究 宁杰 (西南交通大学固体力学博士点) 233
- 3 纤维复合材料微型裂纹损伤本构关系研究 杨光松 (国防科技大学固体力学博士点)..... 239
- 4 混凝土的损伤本构模型及其验证 高路彬 (铁道部科学研究院)..... 252
- 5 空穴多级形核的细观断裂模型和相应的塑性本构方程 张克实 (西北工业大学固体力学博士点)..... 260
- 6 非比例循环加载的一种本构方程初探 彭向和 (重庆大学固体力学博士点) 273
- 7 蠕变—塑性、交互作用的本构描述 钱正芳 (重庆大学固体力学博士点).... 280
- 8 细观与宏观相结合的复合材料非线性本构关系的研究 郭少华 (重庆大学固体力学博士点)..... 286

导 论

——从新的高度和广度来认识研究材料本构关系的重要性

范 镜 泓

(重庆大学工程力学所材料本构理论及应用研究室)

本构关系是力学中的一个基本的关系，它表征着材料（或工程介质）在复杂应力状态、复杂加载历程和复杂环境因素影响下各种物理参量间的定量关系。这种取决于物质内部组织构造的固有关系的数学表达式（本构方程）是研究各种变形体力学问题的基本根据。它对于在更高的层次和更符合物性的基础上发展力学及其相关学科和应用分支具有重要的理论意义；同时它又是进行诸如强度、刚度、稳定性、可靠性和加工工艺等大量工程力学分析的基础，因此它对于解决国民经济重大工程建设、新技术及高技术中提出的各种力学问题又具有重大的应用价值。

一 发展材料本构关系研究的重要性和迫切性

由于生产技术的迫切需要，当代高速大容量计算机、高级材料实验机的出现以及非线性连续介质力学等的发展又为那种反映材料真实响应特性的非线性模型的提出及其在生产中的应用提供了现实可能性，已经并将继续产生巨大的社会效益。以航空、航天、核反应堆等高新技术应用的一大类高温材料为例，其使用的工作环境极其恶劣，而构件的安全性要求则异常严格。如具有代表性的飞机发动机涡轮盘这一重要部件，在每次飞行中，它受起动、高速运转、停车等循环机械应力及热应力的迭加作用，变形与应力响应十分复杂。实践已经证明用经典塑性和蠕变理论难以描述材料的响应特征，这就给零部件设计及寿命预估带来了很大困难，不得不迫使美、法等有关政府机构和大公司加速这一领域的研究。三机部北京航空材料研究所该所的设计与生产工艺需要为背景而撰写的“材料科学及其工程技术应用与本构理论研究的联系”的报告，从中可以看出不仅在航空发动机使用部门的设计分析中需要材料本构关系的研究，且在加工部门，零件生产的工艺过程中为了控制变形程度、合金成分和损伤缺陷，也对本构关系的研究提出了较高的要求，工艺生产中迫切要求解决的另一问题是热处理、焊接、铸造中零件变形与残余应力分析。去年在西安召开的焊接结构与工程学术会议上，呼声最高的是要求加强

焊接影响区的材料本构特性的研究，这是因为大家认识到如果焊接区的物性不正确，有限元的计算结果也失去了根据。在土建、水利、采掘和地下工程中，正确掌握岩土应力与变形的客观规律，对于节约土石方与混凝土用量，加快设计施工进度、防止滑坡、塌方、瓦斯突出和井崩等灾害性事故都具有十分重要的意义。然而长期以来，岩土工程的研究水平不高，究其原因，在于工程人员多从经验着手，而研究人员则常把对金属发展的塑性理论往岩土中套，以致难以反映岩土的许多复杂的性质（如剪胀、液化效应等）。这种情况对岩土工程危害很大，例如成都某水电设计院鉴于有限元计算结果与具体实测差别太大而否定了用有限元进行水工计算的实用性。显然问题不是出在有限元本身而是出在所使用的岩土本构关系与实际差别太大上；又如在地下岩土工程中，支护洞室的新奥法得到了广泛的应用，但该法对洞周应力场的分析建立在岩体是弹塑性介质这一粗略假设基础上，其误差较大，并由于缺乏较好的本构关系来描述岩体的蠕变特性，其第一、二次支护时间及支护参数的确定，取决于不断的现场观测，这是急待改变的。从这些点滴情况我们可以看出美国著名力学家，加利福尼亚大学圣迭哥分校冯元桢教授下面一断话的深刻含义，他说：“土壤、水泥、钢筋结构的本构方程，目前几同未知，闹清楚了可以把土木工程提升一步”。由此可见，本构关系的研究是固体力学学科发展的关键性课题，也是固体力学正确解决国民经济中重大问题最为关键的课题。

二 对力学及工程科学发展之意义

本构关系作为研究变形体力学问题的基本根据，它在研究力学诸分支及其相关的工程科学中的重要地位和作用是有口皆碑的，这里简略介绍几个较重要的学科。

(a) 断裂力学和损伤力学 具有重要工程应用价值的弹塑性断裂力学的发展近年来遇到了较大的困难。 J 积分与 COD 等方法很难解释裂纹前缘空洞萌生、扩大然后与主裂纹联接等复杂的韧性破坏方式，究其原因这是由于弹塑性断裂力学采用的一些本构关系（例如 J_2 全量理论， J_2 流动理论）与裂纹扩展时材料的特性相差较大之故。在一个符合材料真实特性、便于计算的本构关系被提出之前，弹塑性断裂力学要取得较大的进展是困难的。可喜的是损伤力学这十年来的发展，特别是细观机制与宏观表象相结合的研究，已能考虑不同量级大小的损伤对材料本构关系的影响 [注]，从而展示出有可能用含损伤等内部参量的本构方程及相关的损伤失效准则统一描述非弹性变形——局部损伤失效及其演化——宏观韧性破坏这一全过程，从而为每年损失成百亿美元计的构件、机件和特种元件的韧性破坏问题的分析开辟一条新路，这将意味着含损伤等内部参量的本构关系的研究孕育着弹塑性断裂力学的某种带突破性的进展。

(b) 疲劳与蠕变 疲劳在力学与工程科学中占有重要的位置，遗憾的是它的研究长期来

缺乏牢固的理论基础,这使得很多疲劳现象例如疲劳寿命的路径依赖性质很难用现有的观点阐述清楚。事实上疲劳的研究多停留在带经验性的实验上,以至于1984年在美国举行的疲劳学术讨论会上提出的主题竟是“疲劳是一门科学吗?”,同年在印度新德里举行的第六届国际断裂力学会议上Miller和Brawn的大会报告“多轴疲劳:简短的回顾”中承认,虽然经过一百多年的研究工作,但距离解决工程构件在工作环境和循环载荷下的各种疲劳问题还相差很远,他说:“近年来复合疲劳尤其是多轴与混合型断裂条件的研究成果澄清了我们对断裂过程的理解,证明我们过去对疲劳有着若干严重错误的概念,这些概念推迟了我们的进展”,这正是过去大多数在一维情况下进行实验与分析而忽略疲劳下材料本构关系的后果。也许引证美国里海大学薛昌明教授1980年在第一次损伤和断裂的国际讨论会上下面一段话是有益的,他说:“除非某些基本的问题被加以解决,断裂力学将面临停滞...。需要去发展一种现实的本构关系以考虑材料微结构与微缺陷的影响。疲劳裂纹开展是能从这一课题中得到好处的另一课题,损伤积累概念必须通过疲劳过程的路径性质弄清楚。”,这说明了疲劳科学的长足发展也应奠定在材料本构关系的研究上。

(c) 塑性理论 关于对以Drucker公设为基础的塑性理论的详细评论及基于含内变量的不可逆热力学的新的塑性本构理论所展现的希望,笔者在拙著“非线性连续介质力学基础”第十章曾作了详细的论述。多少使人感到惊讶的是在应用经典塑性理论于厚壁圆筒的自增强残余应力和变形分析时,人们发现其计算的内壁残余应变竟比实测的要大得多,而在工程分析时不得不打上高达百分之40的折扣系数;且很难用它来解决大量循环下自增强化工容器和火炮管在连续发射后的残余应力松弛等重要的工程问题。现在研究已经证明一些经典塑性理论出现的问题已经或有可能用高层次上发展的本构理论来加以解决,使作为连续介质力学两大难题之一的塑性理论(另一为湍流理论)有可能出现新的突破的希望。

(d) 粘塑性理论与非牛顿流体力学(流变学) 尽管这两者一个属于固体一个属于流体,其特点与分析要求有很大不同,但它们的本构关系的研究方法却有很多相似之处。它们的率相关、大变形与大转动等共同特性,使得建立符合客观性等原理的本构方程¹⁸⁴为研究的根本任务和主要内容。然而在相当长的一段时间内,研究的观点是不高的,不少工作限于用实验确定一维高速冲击下的材料常数(或粘度等流变常数)。现在由于非线性连续介质力学的发展,特别是不可逆热力学、大变形理论和理性力学的发展,使之具有强有力的武器,例如采用嵌入坐标系的遗传积分型本构方程(或等价地在非牛顿流体力学中采用Oldroyd型坐标系描述的记忆型积分本构方程)。可以期望粘塑性本构理论的研究将有较大的发展,反过来也将对非牛顿流体力学与生物流变学的发展起促进作用。

(e) 复合材料力学 含损伤的复合材料非线性本构关系的研究已变得愈来愈重要,IUTAM后年将为此举行专题讨论会。美国依利诺大学理论与应用力学系的王苏苏(S.S.Wang)教

授今年8月在法国Grenoble市开IUTAM关于各向异性材料屈服、损伤和破坏的专题讨论会时告诉笔者,美国的复合材料发展吃了很多亏,在出了大量问题后军方及工业界才认识到必须加强复合材料力学基础性的研究,这是美国海军、空军等联合拨款2000万美元以在该系建立国家复合材料实验室的一个重要原因。他作为该实验室主任所介绍的研究计划中,含损伤的非线性本构关系占有很大比例。在大会邀请报告中他介绍了局部扭结带(Kink-band)形成扩展、局部失效和宏观本构关系的相互影响,以及材料、结构与损伤失效之间的复杂耦合现象。其实1984年在美国Daton空军基地开的复合材料会议上,美国陆军研究中心Oplinger等人公布的关于带孔层合板非线性分析与实验结果有很大偏差的报告,就已使人们注意到研究含损伤的复合材料的非线性本构关系的重要性。

(f) 岩土力学 本构关系在研究岩土力学中的重要性及迫切性在前节的叙述中及冯元桢教授的评论中已作了阐述,这促使国际上很多突出的力学家如Valanis, Nemat-Nasser, Dafalias等都卷入了岩土本构方程的研究,在学科发展中这一研究的重要意义在于:岩土的本构关系更复杂,在金属中难以观察的现象(如损伤)在岩土中却可以明显地观察到,其方法论反过来对金属特别是有空洞扩张联结机制的金属材料的损伤力学分析有启迪。

(g) 计算力学 计算机与计算力学的发展使反映材料真实特性的本构关系在工程上的应用成为可能,因而是促使材料本构关系研究热潮的基本原因之一,反过来材料本构关系的发展对计算力学的发展提出了新的挑战:a)由于采用较符合材料特性的本构方程,大大扩展了计算力学的工程应用范围,例如描述与预言地震作用下加利福尼亚大坝的变形与崩塌,复杂的锻压、焊接的铸造成型过程及工艺过程的质量控制;b)通过计算力学的手段建立材料的组织结构变化与宏观本构关系之间的联系,例如由单晶及晶界的性能推断多晶体的本构关系,由沙土颗粒的运动及相互作用分析土壤的剪胀和路径相关等本构特性,由奥氏体马氏体的组分及其转变或损伤的演化预测材料的宏观性能等;c)将初边值问题算法的发展与本构关系的建立从大系统上联系起来,从而建立一些经济实效的新算法(例如不采用屈服面)。

(h) 实验力学 材料本构关系研究热潮出现的另一重要原因是实验机及实验技术的发展,反过来材料本构关系的研究对实验力学的发展提出了更高的要求,例如用激光、光学及红外方法对大变形全场应变与温度的动态测定;材料内部损伤等组构参数的测定;三维应力状态下的岩土及金属冲击特性的测定(在研究地震波和穿甲中有重要应用);高温循环棘轮效应、残余应力及相变的测定等。在采用当代红外、激光和声学等新技术以满足这些要求的过程中实验力学必将获得有力的发展,无怪乎即将在天津大学举行的先进实验技术国际会议上,大会国外主席(加拿大)坚持要把材料本构关系研究的实验技术作为会议的重要内容之一。

综合以上分析可见,材料本构关系作为纽带,对促使连续介质力学和相关工程科学

从总体上到各分支的重要发展，有十分深远的意义。

三 国际研究现状及特点

国际本构理论研究十分活跃，美、苏、法、德、日、波等国政府机构、基金会和大公司持续支持与扶持一些有较高学术水平的大学和研究所开展本构理论的研究使之已成为国际上十分活跃的学科前沿研究领域。位于美国辛辛那第市的通用电器公司航空发动机总部就拨了大量研究经费在该公司的研究部，辛辛那第大学航天工程及应用力学系和材料系等对其所使用的主要材料进行非比例加载本构关系和高温蠕变特性的研究，几乎每年该系都有以这类研究作为其博士论文的选题的。今年初笔者访问该系时，了解到一位台湾去的博士生的选题就是通用电器公司涡轮发动机单晶体叶片材料的本构关系，据说该单晶材料制成的叶片在合理的晶格倾向下，其疲劳强度可较普通超耐热合金的疲劳强度提高四倍，且蠕变变形小。这种持续的涉及材料本构关系及材料特性等多方面的研究，使该公司的航空发动机设计制造获得了巨大的技术优势，订货大量增加，单去年在辛辛那第招募的工程师就达700人之多。不久前，美国宇航局鲁易斯研究中心召集了第二届高温非线性本构关系专题讨论会。从会议主席R.L.Thomson写的前言和五个组21篇论文可以看出，正是燃气透平和航天飞机主发动机等技术发展的迫切需要，才促使美国宇航局、其它政府机构和工业界以巨大努力来支持这一基础研究的发展，也可以看到各大学在其中作出的贡献是很大的。1987年8月24~25日在巴黎由法国电力公司主持召开了“第六届国际高温环境下非弹性分析和寿命预测专题讨论会”。亦可看出该公司对本构关系关心的程度及研究工作卷入的深度和广度。日本材料学会近年来在文部省与大公司资助下以东京大学Inoue教授和名古屋大学Murakami教授为核心，联合东京大学等十多所大学的工学部和三菱、千代田、川崎、东芝等大公司的强度研究室以(9/4)Cr-1Mo钢为对象在摄氏650度的高温条件下对国际上通用的各种材料本构方程进行了联合研究，取得了较为明显的成绩。国际本构研究具有下述特点：

(1) 特别注意横向联合研究，例如法国基金会支持巴黎第六大学Lemaitre教授领导的研究所为核心，联合巴黎矿业学院等十余所大学进行的含损伤材料本构关系的研究已获得了很大的进展，并已开始在工作中应用、在国际上享有一定的声誉。笔者今年夏访法时，A.Pinneau教授认为正是这一联合研究，特别是半年或一年的交流，大大提高了研究水平并培养了一批较为突出的人才。

(2) 注意多学科的相互结合与渗透，特别是材料科学、固体物理与固体力学相结合。例如美国Rutgers大学的G.J.Weng(翁荣治)和日本三重大学的德田正孝，在Taylor, Hill和T.H.Lin(林同骅)晶体塑性物理学工作的基础上利用单晶和多晶集合体宏观应变率与各滑移面剪切应变率的本构关系分别研究了金属的蠕变特性塑性—蠕变的耦合，以及复杂应力路径下材料的响应特性，预言了一些和实验相吻合的结果。由于损伤力学的发展

展已有可能在材料的本构关系中引入反映内部组织结构的表征参数（如损伤变量和损伤函数）来反映内部组织结构对性能的影响。如果进而结合材料相应的细观力学模型和失效准则，就不仅可将材料细观物理机制的研究与材料响应等宏观表象结合起来，而且可将用本构方程及相关准则统一研究非弹性变性和局部损伤失效及其演化——宏观韧性破坏这一全过程。这展现了在新的层次上发展塑性、损伤、蠕变及破坏理论的可能性，也展现了强度、刚度、韧性的材料细观结构设计的可能性。这种卷入大变形的损伤本构关系研究的意义已显示在它被列为明年八月在法国Grenoble举行的第十七届国际理论及应用力学联合会的三大主题之一（另两个主题为两相流动力学及地壳力学）。

（3）各种理论模型或派别大量涌现，其间差别较大，虽然有些理论间已呈现互相渗透、补充和接近的趋势、但要想发展一种在各种条件下都适用的本构关系是很难的或者说不必要的。美国空军研究所曾委托华盛顿大学土木、机械和环境工程系1980—1983年完成的“非弹性本构关系的评论和发展”尽管该文献较早，评价人也缺乏应有的知名度，但却涉及了大量的理论，例如在粘塑性本构关系方面，就介绍了采用和不采用屈服面的各六种理论。此后，理论间统一化的倾向似乎加强了，例如已经查明经典塑性理论的主要结果（如米塞斯屈服面和普拉格强化规则）以及最近发展的法国夏波希（Ghaboche）和马秋思（Marquis）的非线性各向同性强化及随动强化理论都可作为内蕴时间本构理论的特例而得。但是前述的日本京都大学和三菱公司等联合用国际上通用的九种不同理论，对 $2\frac{1}{4}\text{Cr-Mo}$ 钢在 600°C 同样的塑性—蠕变干涉作用条件下作的实验与理论对比，发现其间的差别是很大的，有些理论在这种条件下预言较好而在另外的条件下预言较差。值得借鉴的是，日本人在同一试验评价国外各种理论的过程中提出了他们自己的新理论，例如大野重雄的非比例循环加载理论及蠕变理论已在国际上获得承认，并在日本的工业界进行了使用。

（4）理论的发展已从依靠机械能量守恒或损耗等观点建立体系并伴之以实验和经验去总结本构关系定律的方法上升到了新的层次和理论高度。具体地说新的理论框架建立在含内变量的不可逆热力学、理性力学、有限变形等为基本内容的非线性连续介质力学的较坚实的基础之上，从而揭露出过去发展的理论的局限性，其中比较突出的就要1981年在美国斯坦复大学举行的有限塑性变理论讨论会上，Nagtegaal和Jong公布了单调剪切应变导致的波动的不符合实际的剪应力响应的结果，从此人们更加认清了非线性连续介质力学的重要性。笔者去年访问京都大学时了解到井上达雄教授领导的研究室其博士与硕士研究生学习的基本课程，就是每年讨论不同作者编著的非线性连续介质力学，以图反复巩固与提高学生的理性认识。

四 应用前景

本构关系的应用范围极广，几乎遍及各类工程之中，它的应用一般通过改进设计方法、公式、规范、设计规程或改进设计人员的某些思想来实现。

- (1) 岩土本构关系的成果将改变岩土工程设计中很多凭经验设计的方法，大量节约混凝土及土石方的用量，例如中国力学学会理事、南京水利科学研究院沈珠江同志提出的“南科院”土力学本构关系模型，尽管还是初步的工作，但在沿海五个土工结构中应用，发现比原经验方法大为改进，节约了大量基建投资。
- (2) 目前正在设计的黄河小浪底大坝工程的一个重要问题是坝基砂土的液化问题，即砂土在地震波作用下失去彼此间的粘着力而象液体一样流动，它对大坝的威胁是带毁灭性的。为了确定砂土在地震波作用下的响应特性，其核心问题是国际上正在研究的砂土液化本构关系，否则就无法确定其承受的地震波的量级及应采取的措施。同样的问题还包括美国原子研究中心（加州圣地亚哥市）进行的发展岩土本构关系以确定地震波作用下高层建筑与地基的交互作用。
- (3) 目前的高技术竞争中的重要领域是高温结构材料，优势表现在能使用的最高温度上，目前在涡轮盘上使用的材料是In718（国产牌号GH169），使用温度为摄氏650⁰C，符合涡轮进口温度1000-1200⁰C的要求。但现在涡轮发动机进口温度已达1700⁰C，这就迫使人们挖掘一切材料潜力来提高容限，其中象对Rene125合金使用的“相分计算”和等温锻新技术，使锻造不仅是制造工程的一种成形工艺，而且考虑其对形状和显微组织控制的效能。在有了具有考虑内部组构变化的大变形非弹性本构关系后就能用有限元等方法对整个工艺过程进行模拟和控制，大大提高材料的抗高温性能。
- (4) 疲劳是造成很多机械及飞机失事的重要原因，其中尤以低周（或塑性）疲劳的危害最严重。正如前面引证Miller等在ICF-6会议上指出的，过去只注重单轴应力下的疲劳，故得出了很多错误结论。现在通过非比例加载下多轴循环本构关系的研究，就可使疲劳寿命的预测及其改善建立在较可靠的基础上，例如重庆大学本构理论研究室已可用新型的弹塑性本构关系对7400个大气压下厚壁圆筒在脉动循环下的残余应力及应变分布随循环载荷变化的全过程进行分析，在M340计算机上分析1000次脉动循环全过程仅需18分钟，这展示了本构关系在疲劳寿命中应用的重要前景。
- (5) 现在已发现预塑性变形将大大减少蠕变变形，而先扭后拉的循环载荷下的疲劳寿命比先拉后扭的高，材料本构关系的研究能预言这些效果，并可能动地利用它以提高零件的疲劳寿命和使用温度。
- (6) 计及损伤内变量等内部组构变化的本构方程将为压力容器和飞机等的损伤容限设计提供扎实的基础，并使止裂措施建立在更为可靠的基础之上。
- (7) 细观机制与宏观表象相结合的材料本构关系的工作及其与强度、刚度、及韧性的材料细观结构的设计结合起来，将进一步改善双相钢与多相钢的特性，设计出高性能低成本的复合材料与陶瓷增韧材料。

五 主要研究内容

- (1) 非比例加载循环非弹性本构关系的研究及其在低周疲劳寿命预测中之应用;
- (2) 大变形本构关系的研究及其在金属成形工艺与生物组织变形场分析中之应用;
- (3) 含有损伤等内部组构参量的大变形本构关系、损伤演化和局部失效准则、内部组构参量测定的非破坏试验技术及它们在弹塑性断裂力学中之应用;
- (4) 高温及变温下蠕变、相变及有关耦合效应的本构关系及其在高温部件设计和焊接、热处理及铸造过程中应用之研究。
- (5) 率无关、率相关、液化和大变形岩土本构关系及其在岩土工程和地震波作用下响应特性的研究。
- (6) 考虑材料强弱化的塑性本构关系和粘塑性本构关系的研究。
- (7) 含损伤的复合材料非线性本构关系的研究及其在预测层合板刚度损伤及疲劳寿命中之应用。
- (8) 高应变率和高速冲击下材料本构关系的研究及其在穿甲力学中之应用。
- (9) 细观机制与宏观表象相结合的聚合材料与增韧陶瓷材料本构关系的研究。
- (10) 工程介质与生物组织流变本构关系的研究。

本构理论的研究不仅与工程应用息息相关,而且对于促进力学科学的纵深发展,给力学(特别是那些几近停滞的分支)注入新的活力具有十分积极的意义,为那些迄今难以分析的力学与工程问题的解决提供新的基础和希望。从总的情况来看,我国本构理论研究是比较落后的,正确认识国际上研究本构理论热潮的背景和意义,对发展我国本构理论研究,消除与国际水平的差距是十分重要的。

第一部分
固体力学前沿领域
生长点信息的研究

范镜泓 马鸣图 高芝晖

损伤力学的新进展

范镜泓

(重庆大学工程力学研究所材料本构理论及应用研究室)

主题词:

CDM, 损伤机制, 弹性损伤, 弹塑性损伤, 剥裂损伤, 蠕变损伤, 疲劳损伤, 损伤内变量, 演化方程, 本构方程。

一 引言

材料在外载荷和环境因素等作用下, 经常产生着内部细观结构的不可逆变化。其中分布状的细观空穴及微裂纹的萌生及其发展, 不仅导致了宏观裂纹的起始, 也导致了材料的劣化, 例如强度、刚度、断裂韧度的降低和剩余寿命的减少, 由此可见研究这类统称之为损伤的分布微缺陷对力学行为的影响是十分重要的, 这导致了损伤力学的发展, 并越来越引起人们的重视。当处理这类分布性缺陷的发展及其对力学特性的影响时, 对每一个单独空穴和微裂纹进行仔细的分析是十分困难的。一个实用的有效方法是 Kachanov 最早提出的用恰当的变量表征材料损伤状态的连续介质损伤力学模型。这种模型从方法论的角度上来看相似于用位错密度张量表征材料位错影响的连续位错分布理论, 或者用材料微元的内蕴时间来表征在各滑移面上位错分布影响的内蕴时间型理论。从这种模型出发建立的关于具有分布性空穴与微裂纹材料的力学理论称之为连续介质损伤力学理论 (CDM), 对该理论发展状况的某些评论请读者参看笔者和张俊乾同志在中国科学上发表的论文 [1] 及其参考文献。

本文首先回顾近年来国际上关于各类损伤物理基础的研究 [2], 以了解它们相应的细观图象是什么, 这对于我们建立正确的理论无疑是重要的。其次介绍关于损伤材料本构方程和损伤变量等研究中的一些新进展。

二 不同类损伤的细观机制与特性

(1) 弹性损伤和弹塑性损伤

在载荷增加时出现的材料损伤是由于在弹性和弹塑性变形过程中细观空隙与微裂纹

的逐渐形成和扩展而导致的。纯弹性损伤一般在脆性材料，如岩石、混凝土、复合材料和脆性金属中观察到，对地质材料来说，损伤是垂直于最大主应力方向（或最大压缩应力方向）的平面内形成的微裂纹。图 1 a 是 Dragon 与 Mroz 给出的岩石与混凝土在单轴与拉伸下的损伤过程，由图中可见损伤造成了迟滞回线，也引起了体胀过程。

在金属与合金中的弹塑性损伤是弹塑性变形过程中微空穴的起始与扩展，滑移的交切，杂质颗粒从材料基体中的脱开和破裂等原因形成空穴而造成的。在解理断裂——纤维断裂转变温度之下，空穴形成或者是晶粒内由滑移交切造成的解理裂纹或者是滑移与晶界交切在晶界处形成的脆性碳化物质点的裂开 [Knatt, Tatelman McEvily]。在解理——纤维转变温度以上则损伤是由晶界及晶内的空穴所形成。

与金属及岩土损伤特性不同，复合材料的弹性损伤和弹塑性损伤，包含着基体开裂，脱层，纤维断裂，纤维—基体脱开等多种复杂的机制，也存在着局部扭结带形成扩展，局部失效和宏观本构关系间的复杂的耦合作用。

（2）剥裂损伤 (Spall damage)

在冲击载荷下形成的空穴与微裂纹与上面提到的拟静态下的损伤有着较大区别，它是较均匀的，且分布面较广。这与作用时间太短而难以使这些空穴扩展有关。这种类型损伤被称之为剥裂损伤 (Spall damage)。

（3）蠕变损伤

在多晶体金属中的蠕变损伤是由微细圆空穴的起始与扩展及楔形裂纹组成的 [Ashby 等]，它们大都出现在与最大拉应力垂直的晶界上，其起始是以晶界滑移作为先决条件。圆形空穴常出现在较高的温度与较低的应力之下，它的扩展则基于下述两种机制，即空穴沿晶界的扩散与凝集以及应变控制下晶界滑移而造成的扩展。楔形裂纹则是在较高应力与较低温度下在三重晶界的交点上产生的，它形成的原因一是由于晶界滑移造成的应变集中，另一是细观空隙的联结，它们大多在垂直于最大拉伸应力的晶界上发展。

（4）疲劳损伤

多晶体中的疲劳损伤与前述几种损伤的机制不同，它的损伤过程包含下述几部分：

（1）在有利倾向的晶体的活动滑移带内裂纹的起始，（2）沿与最大拉应力方向成 45° 角的滑移带的裂纹的扩展（第一阶段），（3）沿最大拉伸应力方向的扩展（第二阶段）。试验观察到的裂纹一般说是从材料表面开始形成，而它们的倾向与分布与所加应力的方向及状态密切相关。

（5）蠕变——疲劳损伤

当金属与合金在高温下受重复应力作用时，材料在蠕变损伤和疲劳损伤的组合作用下而劣化，鉴于上面提及的这两种损伤的区别，这些损伤的作用本质上是分开的。于是蠕变损伤与疲劳损伤的干涉程度取决于加载条件，即每种载荷循环作用在这两种损伤中的相对效应。不难想像由于这两种损伤的机制不同，在损伤的最初阶段两种损伤不会出

现耦合。至于损伤发展的后面阶段, 试验表明蠕变损伤将加快疲劳损伤, 而疲劳对蠕变损伤的影响则较小。有关说明上述损伤机制的图片将在会上介绍。

三 损伤内变量等方面的进展

材料损伤过程的理解及其恰当的力学描述对于讨论材料劣化对宏观响应特性的影响, 以及解释从这些缺陷到最后断裂的过程是十分重要的。在连续介质损伤力学中这种分布损伤状态的描述是用损伤内变量来表示的。损伤过程及其对力学特性的影响则是用损伤变量演化方程和损伤材料本构方程来加以表示的。

现今为止所使用的不同的损伤变量有标量, 矢量, 二阶张量等。Lemaitre等引入弹性张量的减小作为损伤变量, 虽对弹性损伤有价值, 但在描述弹塑性损伤时就显得物理上不够坚实。在文[1]中笔者等引入了几个标量 Z^*, X_0, X_1 作为弹塑性损伤的度量, 可以比较全面地满足该文提出的损伤内变量与塑性内变量互相耦合的模型需要, 这种实际上存在的很重要的耦合在 1958 年 Kachanov 的工作中是忽略了, 因而严格来说它只适用于脆性材料的蠕变。以后 Rabotnov 用简单方式引入了这种耦合后来则由

Lemaitre 扩展为等效应变假设, 即用受损后材料的有效应力代替无损材料本构方程的应力来建立损伤材料的本构方程, 显然这是一种较近似的工程方法。在文[1]中用含内变量的不可逆热力学讨论了在那些特殊情况下, 应变等效性假设可以成立, 这对于澄清理论概念是必要的。此外应指出的是根据实际工作的特点, 可对文[1]的较普遍的方程作出不同于等效应变假设的相应的简化。

从前一节叙述的损伤机制可以看出损伤具有明显的方向性, 但在很多实际情形中由于空穴的随机分布或球形空穴的均匀分布则采用各向同性损伤的假设是较为合适的。但若空穴密度很大或 ν 和变形是各向异性的, 则应考虑损伤是各向异性的情况, 这时标量性的损伤变量就不能描述了。Murakami 等曾长期进行各向异性损伤的研究, 但由于提出的损伤张量较复杂且观念不够清晰, 进展较缓慢, 最近他提出了“虚拟无损构形”(fictitious undamaged configuration)的概念将 Kachanov-Rabotnov 蠕变损伤的原始思想拓广到一般的三维异性损伤情况[3], 这是值得一提的, 下面我们就来介绍它。

从 Kachanov-Rabotnov 原来的一维损伤理论来看, 其损伤变量 D 可由损伤材料真实的横截面积 A 与随损伤发展而不断减小的净承载面积 A^* 之间的关系来表征, 即

$$A^* = (1-D)A \quad (1)$$

这里 A 可看成 Murakami 引入的“虚拟无损构形”。之所以说它是虚拟的是因为它实在是受损材料的真实构形, 而不是无损的。应用式(1)于应力分析, 则它意味着材料损伤的影响, 主要是由于净面积减小而造成了应力的增加, 这种应力称之为有效应力 $\bar{\sigma}$, 可由下式表示:

$$\bar{\sigma} = p/A^* = p/(1-D)A = \sigma/(1-D) \quad (2)$$