

带缺陷物体流变学

杨挺青

(华中理工大学力学系, 武汉 430074)



杨挺青, 生于1934年8月, 华中理工大学教授, 博士生导师。1958年, 于华中工学院(现为华中理工大学)机械工程系毕业后留校任教, 1963年~1964年在北京大学数学力学系进修固体力学, 1981年~1982年在美国Rutgers大学力学与材料科学系访问工作。长期从事材料力学、固体力学教学与科研工作。1978年以来致力于材料本构关系、粘弹塑性理论及其应用的研究, 在国内外发表学术论文50余篇, 编著有《粘弹性力学》, 合作主编《力学及其工程应用》, 参编其他论著2本。现任中国力学学会常务理事, 《固体力学学报》副主编, 《力学学报》编委, 中国力学学会教育工作委员会副主任委员, 中国力学学会、中国化学学会流变学专业委员会副主任委员。

摘要 本文简要介绍带缺陷物体的流变力学, 探讨这一分支学科的由来、基本内容, 以及若干研究进展, 并试述若干应用前景。

关键词 缺陷, 带缺陷物体, 流变学

一种非常微小, 以致我们察觉不到的起因, 可能产生一种显著的、我们决不会看不到的结果, ... 初始的微小差异导致最终出现根本不同的现象。

—— H. Poincare

1 引言

中国力学学会关于1997年在我国召开“带缺陷物体流变学国际研讨会”的报告, 在国际理论与应用力学联合会1994年理事会上投票通过(IUTAM Symposium on Rheology of Bodies with Defects, Sept. 2~6, 1997, Beijing)。带缺陷物体流变学国际会议的科学委员会由8名国际著名学者组成, 中国科学院院士、北京大学王仁教授任主席。这是我国流变力学工作者所关切的一次重要会议, 它的召开将对我国这一领域的研究工作产生积极的推动作用。

中国力学学会、中国化学学会流变学专业委员会商议决定, 于1996年10月在湖南湘潭大学召开一次国内的带缺陷物体流变学研讨会, 藉以交流这一领域的研究成果, 探讨学科研究的进展与趋势, 推荐参加1997年IUTAM研讨会的中方论文, 商谈攻关协作事宜。

本文略述带缺陷物体流变学的由来之后, 简要介绍其基本内容、近期的一些研究进展, 以及若干应用前景, 希望得到有关领域同仁们的关心、指导与帮助。限于篇幅, 本文不拟引述大量的文献资料, 有兴趣的读者, 可通过文末主要参考文献及其中引述的国际国内研究成果了解带缺陷物体流变力学的具体内容与进展。

2 由来

材料与结构的形变过程与破坏规律是固体力学、材料科学研究的基本内容, 是结构设

计的重要基础。随着近代科学技术的进步和现代工程建设的加速,材料力学性能与破坏机理的研究取得了迅猛的发展,同时也提出了许多固体力学新课题^[1~4]。

在结构、机械及其它工程中,许多破断或失稳事故往往不是在受载瞬间或启用初期就出现,而是在经历一段时间或相当长的时期以后才发生;许多新型材料和在特殊工况下的常用工程材料都必需考虑其时间相关的力学行为。因而逐步形成一力学分支,即流变学(见《力学》中国大百科全书卷 p322~325)。流变学研究材料和结构在外力、形变、温度、湿度、辐射以及各种耦合作用下与时间相关的变形、流动和破坏的规律^[5,6]。它是一门由力学、化学、工程学科综合与交融的边缘学科。流变理论应用于各领域时,又产生许多流变学的新分支,如聚物流变学、生物流变学、岩石流变学、食品流变学、加工(工艺)流变学、电流变学、环境流变学,等等。

物体往往含裂纹、空穴、孔洞、裂隙,以及位错、夹杂和界面损伤等各种缺陷。其尺度层次可能很不相同,有宏观、细观和微观之别。这些缺陷或是天然的、长期演化形成的;或是在材料和结构制备过程中不可避免地产生的;或是出于性能改进或功能要求等目的而人为设置的;或是在某些复杂或严酷的条件下出现的。因而,有时用“缺陷”二字未必确切,但人们可以理解。多年来,国内外关于带缺陷物体形变与破坏规律的研究取得了一系列的重要成果^[7~11]。

研究带缺陷物体随时间变化的力学特性和破坏规律,讨论含缺陷材料的粘弹塑性行为和本构关系,探求带缺陷结构与时间相依的响应和失效过程,在理论上涉及粘弹塑性力学、损伤力学、断裂力学、材料科学、流变力学、连续统理论,以及近代物理和现代数学,充分体现多学科的交叉和融合。1980年以前,国际上已有关于粘弹性介质中裂纹体方面的研究,如讨论延迟断裂、粘弹体起裂与扩展的理论、计算及其测试等^[12~14]。

当代科学技术的长足进步,使得在许多论著中均体现或预示着流变力学和许多相关学科分支协同发展、相互渗透与交融^[12~16]。带缺陷材料与结构的流变规律和破坏理论研究更是如此。因而,袁龙蔚认为^[1],除已有的损伤力学、断裂力学、粘弹性断裂力学外,有许多分支学科与流变断裂学紧密关联,故提出一个“含缺陷物体的流变学”,从宏观、细观、微观相结合地研究损伤演化与缺陷扩展的耗散过程及流变规律。它是流变学的重要分支,系固体力学前沿的一个研究内容。

3 主要内容

带缺陷物体流变学揭示时间相关的材料损伤演化、缺陷扩展、形变过程与破坏机理,研究缺陷变化的动力模式、物体粘弹塑性行为及本构关系,探讨带缺陷物体的流变破坏理论和结构失效准则。

在工程结构及机械产品中,所使用的各种金属、陶瓷、岩石、橡胶、高聚物、混凝土、生物材料、复合材料和智能材料,在制造过程中,在不同环境与工况条件下,往往出现裂纹、孔洞、夹杂、或界面缺陷,成为带缺陷的物体。研究带缺陷物体的流变规律,必须将材料的宏观力学行为研究和它的细观结构与微观机制相结合,探求它们之间的联系,测定它们与时间相依的力学、热学、几何、化学有关量,并定量表述它们之间的关系。由于物性与时间相关,缺陷形成与发展过程有时序,外界作用可能随时间而变化,物体中的应力场、位移场、温度场等将不断地重新分布,必须综合考虑物体性状、几何形体、缺陷演化和外部作用的时间相依。因而,缺陷体流变学研究的是一个非线性、不可逆、耦合作用的过程。

对带缺陷物体流变过程的研究, 还将探讨物体长期强度、流变破坏理论与结构失效准则, 以便判定其安全性, 预测其使用寿命. 同时也为研究材料改性和设计新材料提供有关的理论依据.

物体流变及其中缺陷演化是不可逆过程, 一般说来, 属于非平衡态的热动力学系统, 广泛涉及处理局部与非局部关系, 并存在突变、分叉或混沌等问题. 因此, 带缺陷物体流变学的发展在很大程度上有赖于系统热力学理论、现代数学工具、先进的实验手段以及计算机模拟技术.

4 近期进展

带缺陷物体流变学的研究正处于初始阶段, 在此简述其近期的一些进展.

关于带缺陷物体流变过程的基本理论研究, 在文 [1] 中作了多方面的阐述与概括, 提出了许多值得探索的问题. 例如: 关于带缺陷固体的平衡律、质量流、热力学以及对于金属材料的热磁效应研究; 关于裂尖温度场、损伤演化以及裂纹扩展判据等方面的探讨. 文 [1] 还用相当的篇幅介绍了某些实验及其结果. 如: 利用 CT 机、红外辐射摄像机、多量程磁强计、超高温金相显微镜和 X 射线衍射仪, 分别测量了缺陷演化过程中微缺陷周围及宏观缺陷尖端附近形成的质量密度场、温度场、金属材料的磁场与位错场的变化规律, 通过实验与理论研究, 分析缺陷的演化、扩展规律, 直至破坏的全过程.

关于带缺陷物体蠕变和粘弹性断裂力学研究, 在弹塑性断裂力学一系列成就^[7~10]的基础上, 取得了许多研究成果^[12~15], 可参阅论著 [12]~[15] 及其中介绍的参考文献. 在 IUTAM 最近召开的结构蠕变研讨会上也有带缺陷结构蠕变研究的论文^[17], 我们曾作有关论述 (见《国际学术动态》1991 年第 1 期). 近几年来, 国际上许多学者颇为重视缺陷体粘弹性力学的研究, 例如: 粘弹性材料 (含复合材料) 中缺陷起裂、扩展的描述参量及其测定^[17]; 线粘弹性裂纹、孔洞扩展, 蠕变断裂模型及其相关的理论分析^[18~21]; 缺陷体非线性粘弹性特性、热动力学理论及应用研究^[15,22]; 宏观结合, 追溯粘弹性物体中孔洞与裂纹的成因, 考虑界面效应, 探索损伤演化与缺陷扩展规律^[22,23]; 通过计算模拟与数值分析, 探讨裂纹蠕变扩展、孔洞变化规律与过程^[23~25]; 研究带缺陷结构的寿命估算与安全评定^[17] 等等.

在国家科委、国家自然科学基金委及中国力学学会于 1994 年组织的两次“21 世纪中国力学发展研究”讨论会中, 也有不少涉及带缺陷物体流变力学 (或相关) 的论述. 例如: 各种材料强度理论的研究 (郑哲敏); 非线性动力学与地球动力学 (王仁); 非线性力学、材料和材料工艺学 (李和娣); 固体强度难题 (白以龙); 分形力学 (谢和平); 耗散变形热力学理论 (王自强); 细观结构力学与破坏力学 (余寿文); 固体细观理论的突破性成就 (杨卫); 材料力学行为与材料设计 (虞吉林); 三峡船闸高边坡中力学问题 (王思敬); 断续介质力学 (葛修润); 图案动力学用于研究材料非线性现象 (何国威), 等等. 从以上内容可以认识和领悟到带缺陷物体流变问题的重要性, 有关进展与需求, 研究手段与方法, 为人们研究带缺陷物体流变学提供了丰富的内容, 探索了应用前景.

5 应用前景

从带缺陷物体流变学基本内容与研究进展看, 所涉及的应用范围相当广泛, 这里试从下列几方面作粗浅的说明.

(1) 提高材料蠕变与耐热抗力 现代工业需要耐高温耐蠕变的金属、合金、陶瓷和高强

度聚合物,它与固体蠕变损伤、粘弹性断裂紧密联系.航空工业中,高温条件下各种金属和复合材料随时间而变化的性能,直接关系着机件和结构的功能、寿命与可靠性,况且往往含有或出现一些难以察觉的各种缺陷.因此, Crance 和 Charles 撰著的《工程材料选用》一书(中译本.科学出版社,1990),专章论述“蠕变抗力与耐热性”.

(2) 考虑结构长期强度与稳定性 岩石是一种天然材料,一般岩体均被地质构造节理切割成非均质、各向异性体.三峡工程永久船闸高边坡,因环境、工况与功能要求,可说是一种含“缺陷”的结构,“要求上部不应有大的卸荷裂隙,下部不得有小的长期变形(流变),这是难度很高的重大技术难题”^[16].这种造福后代的大型工程,应以百年乃至千年为时间尺度,故而这类工程中岩基的长期强度与稳定性问题不容忽视.据悉,湖南柘溪水电站混凝土大坝的裂纹处理,考虑了缺陷的流变分析,曾获国家教委科技进步奖.

(3) 粘结焊接技术与成型加工技术方面 美国加州理工学院教授 Knauss 在粘弹性断裂力学的研究基础上,最近分析粘结面上裂纹问题^[21].各种塑料制品和高温条件下的焊接件,往往存在带缺陷的材料或结构的流变力学问题^[12,13,17].最近张家泉等^[26]发现,319合金存在固态液态共相的特殊流变性温度区,对于这种合金凝固过程建立了一个粘弹塑性模型,并试用于凝固过程仿真的力学建模,这对于凝固缺陷的控制与避免是个很有意义的探索.

(4) 结构安全评估与寿命预测 带缺陷物体的蠕变研究,对于飞机、航天器、地下电站(水电、核电、地热电)、海洋工程设施都有重要意义,有助于结构寿命预估和可靠性估算等有关难题的解决.这从文^[17]中的一些研究结果可见一斑.利用超声、激光技术对构件应力、变形以及损伤的宏观变量进行测试研究、进行无损估价(NDE)有很大的工程应用价值(如华中理工大学吴克成等在九江大桥、秦山核电站、大同电厂的有关机(构)件中应用超声技术取得的成果),也为缺陷物体流变测试提供了借鉴.

(5) 老龄结构补强措施 根据工程设计要求,某水电站大坝需要加高并采取补强措施,将已用多年的混凝土坝增高加厚,因而产生体内缺陷与接合界面问题.这类工程结构的长期强度与稳定性,必须加以论证.另如各种边坡、岩洞、隧道,许多军用与民用设施或产品,也往往存在补强后的流变破坏问题,只是其迫切性与重要性的程度不同罢了.

(6) 特殊工况下的缺陷体流变问题 据1993年举行的国际岩石力学会议有关论文报导,人类发展利用核能,却还没有找到安全永久处理核废料的办法,现阶段倾向于利用深部岩石洞室.考虑放射性核元素在岩石洞室中的释放和迁移规律,一些核元素半衰期很长,而且在围岩应力、地下水渗流、地温及热辐射作用下,岩体的流变性和长期稳定性一直是关注的重点,现有研究中初步考虑的时间为500年.目前欧洲已有多个国家建立实验室进行研究,其中自然需做带缺陷物体流变规律的研究.

(7) 新材料设计与研制 许多新型材料的制备、加工、增强或增韧,常处于或部分地处于高温、高压、高能束流等严酷条件之下;或是多相复合和人为地夹杂异质物的过程.因此,一些特殊合金,各种聚合物产品,各种增强(树脂基和金属基)复合材料,各种薄膜封装制品,各种机敏材料和组件,都往往要考虑时间相关的力学行为和长期强度与稳定性.其中许多涉及带缺陷物体流变理论及其应用问题,且难度相当大,有待研究解决.

6 结 语

带缺陷物体流变学,考虑的是一个非线性、非平衡态的耗散过程,采用宏细微观相结合的方法,研究损伤演化与缺陷扩展的耗散及流变规律,探求含缺陷流变体的时间相关力学

行为与破坏理论.

带缺陷物体流变学是处于流变学、固体力学、材料科学、现代物理学和现代数学间的一门横跨学科,它的主线是非线性流变动力学.它与各种工程学科关系密切,在材料、化工、能源、交通、航空、航天、机械、土建、船舶、海洋和生物工程等领域有其广泛的应用前景.

带缺陷物体流变学的研究正处于初始阶段,有很多“连基本概念也还不十分清楚的问题”,其理论尚不完善,实验与计算技术亟需加强,

应用方面亦有待进一步探索和开发.这些都有赖于从事力学及相关学科的同仁共同努力.我们祝愿在“21世纪中国力学”的百花丛中,有一朵“带缺陷物体流变学”的奇葩!

参 考 文 献

- 1 袁龙蔚. 缺陷体流变学. 北京: 国防工业出版社, 1994
- 2 Christensen S M. Heterogeneous material mechanics at various scales. *Appl Mech Rev*, 1994, 47(6-part II): S20~S33
- 3 余寿文. 固体力学与材料科学交缘的几个新课题. *力学进展*, 1994, 24: 24~36
- 4 杨挺青. 粘弹性本构理论及其应用. *力学进展*, 1992, 22: 10~19
- 5 袁龙蔚. 流变力学. 北京: 科学出版社, 1986
- 6 杨挺青. 粘弹性力学. 武汉: 华中理工大学出版社, 1990
- 7 黄克智, 余寿文. 弹塑性断裂力学. 北京: 清华大学出版社, 1985
- 8 段祝平, 黄迎雷, 王文标. 缺陷连续统理论及其在本构方程研究中的应用. *力学进展*, 1988, 18(4): 433~456; 1989, 19(2): 172~194
- 9 黄筑平, 杨黎明, 潘睿麟. 材料的动态损伤和失效. *力学进展*, 1993, 23(4): 433~467
- 10 龙期威, 熊良钺. 位错、裂纹与断裂. *力学进展*, 1991, 21(1): 31~38
- 11 邓伟, 杨挺青. Singularities and explicit solutions of collinear crack problem in anisotropic media. *Acta Mech Solida*, 1995, 8(2): 133~153
- 12 袁龙蔚, 张淳源, 周筑宝等. 粘弹性断裂译文. 湘潭大学自然科学学报(专辑), 1983
- 13 袁龙蔚, 智荣斌, 李之达. 流变断裂学基础. 北京: 国防工业出版社, 1992
- 14 张淳源. 粘弹性断裂力学. 武汉: 华中理工大学出版社, 1994
- 15 王晓明, 沈亚鹏. 热动力学理论在粘弹性断裂力学中的应用. *固体力学学报*, 1994, 15: 58~64
- 16 哈秋龄. *力学进展*, 1994, 24(4): 437
- 17 Zyczkowski M (Ed.). Creep in structure. IUTAM Symp. Cracow/Poland 1990: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1991
- 18 Lis Z & Litewka A. Theoretical model of creep fracture under triaxial state of stress. *Nucl Engng Des*, 1993, 144(3): 497~508
- 19 Wang Y M, Weng G J. Self-similar & transient void growth in viscoelastic media at low concentration. *Int J Fract*, 1993, 61(1): 1~16
- 20 Linkov A M. Boundary value problem for crack growth in viscoelastic media. *Int J Fract*, 1994, 65(2): 197~218
- 21 Knauss W G, Losi G U. Crack propagation in a nonlinearly viscoelastic solid with relevance to adhesive bond failure. *J Appl Mech*, 1993, 60(4): 793~800
- 22 Liaw P K et al. Crack propagation behavior under creep condition. *Int J Fract*, 1992, 54(4): 329~343
- 23 Van der Burg M W D, Van der Giessen E. Simulation of microcrack propagation in creeping polycrystals due to diffusive grain boundary cavitation. *Appl Mech Rev*, 1994, 47(1): S122~S131
- 24 Kienzier R, Hollstein T. Numerical & experimental investigations of creep crack growth. 1992, N92~19945/4/GAR
- 25 Budkowska B B, Grzesiak W. Simulation of the effects of subpavement cracks in a layered viscoelastic medium. *Arch Civil Eng*, 1993, 39: 193~214
- 26 科学通报, 1995, 40(7): 600~604

(1995年7月3日收到)