

固体力学 若干新进展

第一届全国固体力学青年学者研讨会论文集

主 编

冯西桥 陈伟球
孟庆国 詹世革

清华大学出版社

固体力学若干新进展

第一届全国固体力学青年学者研讨会论文集

主 编

冯西桥 陈伟球
孟庆国 詹世革

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书是 2005 年 10 月在杭州召开的第一届全国固体力学青年学者研讨会的论文集,共收集了与会代表的 29 篇论文;内容不仅反映了固体力学若干前沿领域在理论、实验和计算方面的一些最新研究成果[例如微纳米力学、生物力学与仿生学、新型材料(包括声子和光子晶体、纳米材料、智能材料、绿色复合材料等)的力学、多尺度力学和多学科模拟方法、无网格计算方法等],而且也体现了固体力学在成形加工技术、压力容器和管道的安全评定方法、建筑结构火灾失效分析、激光热应力切割等诸多工程领域的日益广泛的应用。

本书可供固体力学、生物力学、材料科学及相关领域的科研人员及高等院校有关专业的师生参考使用。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

固体力学若干新进展:第一届全国固体力学青年学者研讨会论文集 / 冯西桥等主编. —北京:清华大学出版社, 2006.11

ISBN 7-302-14005-7

I. 固… II. 冯… III. 固体力学-学术会议-文集 IV. O34-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 121808 号

出 版 者:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社 总 机:010-62770175

地 址:北京清华大学学研大厦

邮 编:100084

客户服务:010-62776969

责任编辑:陈朝晖

印 装 者:北京华联印刷有限公司

发 行 者:新华书店总店北京发行所

开 本:185×260 印张:25.5 字数:602 千字

版 次:2006 年 11 月第 1 版 2006 年 11 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-302-14005-7/O · 582

印 数:1~500

定 价:89.00 元

序 言

在我国固体力学界，活跃着一大批有着良好研究基础和发展态势的青年学者，他们在固体力学的不同领域已经取得了有一定影响的研究成果，并将在今后对本学科的发展起到越来越大的作用。因此，如果能够为他们提供更好的科研条件和更大的舞台，无疑将加快他们的成熟步伐，对我国固体力学的进一步发展有十分积极的意义。鉴于此，国家自然科学基金委员会数理科学部组织发起了“第一届固体力学青年学者研讨会”，会议由国家自然科学基金委员会数理科学部和中国力学学会共同主办，于2005年10月14日~16日在杭州浙江大学召开，会议主席由清华大学冯西桥教授和浙江大学陈伟球教授担任。

本次研讨会邀请了从事固体力学研究的 4 位著名青年科学家（方岱宁教授、汪越胜教授、魏悦广研究员、吴林志教授）以及 28 位 40 岁以下的优秀青年学者，就他们的近期研究成果进行了较为系统和深入的交流，并就固体力学发展的新趋势以及所面临的挑战性科学问题进行了认真研讨。

本论文集收集了与会代表的 29 篇论文（以第一作者姓名汉语拼音为序）。内容不仅涉及固体力学若干前沿领域在理论、实验和计算方面的最新研究成果〔例如微纳米力学、生物力学与仿生学、新型材料（包括声子和光子晶体、纳米材料、智能材料、绿色复合材料等）的力学、多尺度力学和多学科模拟方法、无网格计算方法等〕，而且也反映了固体力学在诸多工程领域的日益广泛的应用（例如成形加工技术、压力容器和管道的安全评定方法、建筑结构火灾失效分析、激光热应力切割等）。

本次研讨会得到了国家自然科学基金委员会数理科学部和浙江大学建筑工程学院的大力支持。除了 4 位主编之外，清华大学赵红平博士和研究生郑修鹏、史云斐、夏热参与了论文的编辑工作，在此表示感谢；也感谢清华大学出版社对本论文集出版的大力支持。

此外，本次研讨会的与会代表一致认为，这一会议为青年学者提供了一个非常好的交流平台，因此建议将其办成系列会议。第二届全国固体力学青年学者研讨会将于 2006 年 8 月在成都西南交通大学召开。

冯西桥 陈伟球
孟庆国 詹世革
2006 年 4 月

目 录

超轻多孔金属材料的本构行为研究	陈常青	1
微尺度力学及生物力学中几个典型问题的介绍	陈少华	12
回传矩阵法的理论基础.....	陈伟球	26
电磁弹性介质中局部脱粘圆柱异相体对反平面 剪切波的散射	杜建科 王 骥 沈亚鹏	40
界面端应力奇异性与复合材料界面剪切强度细观试验方法的评定	戴 璞	52
微谐振器的热弹性尺度效应.....	方岱宁 孙玉鑫	63
微动疲劳微动磨损过程中循环塑性的机理研究	冯 露	72
含缺口金属材料疲劳寿命预测新方法研究	冯淼林 高 慧	87
家蚕蚕茧的结构与力学性能研究	冯西桥 赵红平 崔为正 邹凤竹	95
基于高阶 Cauchy-Born 准则的单壁碳纳米管 力学性能预测.....	郭 旭 王晋宝 张洪武	110
水性聚合物—异氰酸酯断裂性能的能量 释放率评价.....	胡宏玖 朱卫平 刘 红 赵俊瑾	119
工程材料的循环棘轮行为研究.....	康国政	128
跨尺度、跨学科理论计算方法探索和实践	刘 彬	148
计算力学在高分子成型加工中的应用	李海梅 申长雨 曹 伟	164
防热材料高温烧蚀性能的理论及实验研究	梁 军	176
纵向磁场下铁磁板的自由振动分析	梁 伟 刘冬欢	192
纤维表面处理对于剑麻纤维增强复合材料的力学和断裂性能的影响	李 岩	201
含体积型缺陷压力容器和管道的安全评定 ——力学与工程的结合.....	刘应华 陈 钢 徐秉业	213
微孔洞损伤尺度效应的若干研究	李振环 黄敏生	237
镍钛形状记忆合金相变行为相关的摩擦学研究	钱林茂 周仲荣	248
MLPG 法的多尺度模拟方法	申胜平 S. N. Atluri	263
脆性材料激光热应力切割的仿真和控制研究	陶伟明 毕国丽 郭乙木	271
爆炸与结构动态响应中的几个问题研究	王 成	281
功能梯度材料典型结构的断裂力学研究	吴林志 果立成 马 力	301
声带隙功能材料的科学问题及力学思考	汪越胜	323
聚酰亚胺无机杂化薄膜的热力学性质研究	王正道 付少云	343
SPH 方法的研究进展及微小试样拉伸材料性能试验方法研究.....	徐 绯	358
波晶体及应变可调光子晶体.....	许震宇	377
自适应多尺度再生核质点法在形状优化设计中的应用	周进雄 张智谦 张 陵	387

超轻多孔金属材料的本构行为研究

陈常青

西安交通大学航天航空学院, 西安 710049

摘 要 超轻多孔金属材料是近十年来发展起来的一种新型材料, 具有密度低、吸能性好、降噪和散热特性好等优异的物理和力学性能以及潜在的多功能组合特性。本文介绍了超轻多孔金属材料本构行为的细观模型计算、宏观唯象理论建立和试验等方面的研究进展, 并对今后需解决的问题进行了讨论。

关键词 超轻多孔金属, 本构行为, 细观力学模型, 宏观唯象模型

1 前言

近十年来, 一类新颖的超轻多孔材料——泡沫金属材料 (cellular metals/metal foams) 和规则点阵结构材料 (lattice materials) 引起了人们的广泛重视。这些超轻金属材料所具有优异的物理和力学性能以及潜在的多功能组合特性 (例如, 超轻、高强韧、耐撞击、高比强、高比刚度、高效散热、噪声管理和多功能集成), 使得它们在高科技及国防工业中有着非常重要的意义。当前, 超轻多孔金属材料的研究重点在于材料的制备工艺和技术、材料宏观性能表征及其多功能化基础和应用^[1~4]。对超轻多孔金属材料宏观性能表征则包括其力学、热学、声学等特性的表征, 一方面是为了建立宏观表征理论体系以利于指导其工程应用设计, 另一方面是建立其宏观性能与其微细观组织结构间的定量关系以指导多孔金属材料微结构设计和制备。本文主要介绍超轻多孔金属材料本构力学行为研究进展, 依次介绍多孔金属材料本构行为的细观模型计算、宏观唯象理论和试验, 最后介绍一些有待解决的问题和今后的主要研究方向。

2 超轻多孔金属材料本构行为研究

近十年, 人们在多孔金属材料本构行为的研究方面已有大量的工作并取得一定进展。

这些工作可归结为细观力学模型、宏观唯象本构模型和试验三个方面。

2.1 细观力学模型计算

超轻多孔金属按其微细观组织结构规则程度可分为有序和无序两大类^[2~4]，有序多孔金属材料如三角形、四边形、六边形等蜂窝材料和规则点阵材料，无序多孔金属材料则主要是指泡沫化材料如泡沫金属。由于多孔金属材料的微细观组织结构尺寸（主要是指孔径）往往在亚毫米或毫米量级以上且比较容易识别，另外其实体材料的特性也比较容易用试验方法确定，因此采用细观力学方法研究其宏观材料性能是一种比较自然的选择。通过相对简单的周期性单元胞模型，人们可以得到一些多孔材料宏观材料参数的简洁表达式（图 1 所示为一些典型周期性单元胞），而复杂的超级单元胞模型则能更准确地揭示其定量关系和变形的物理机理，此时往往需借助有限元等数值计算方法。

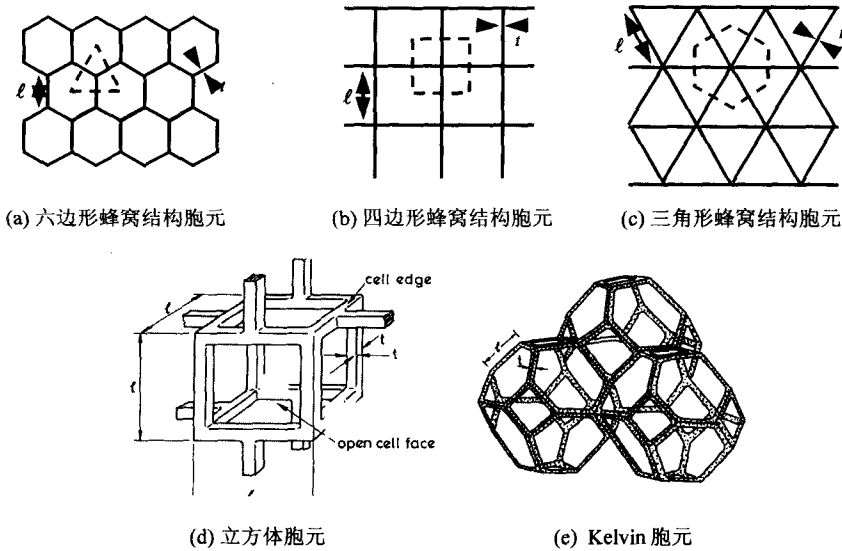


图 1 几种常见的多孔材料周期性单元胞：(a)~(c)分别为六边形、四边形和三角形蜂窝结构的二维单元胞，(d)、(e)为立方体和 Kelvin 三维单元胞

2.1.1 周期性单元胞模型

周期性单元胞模型通常适用于有序多孔材料，专著[2]详细地介绍了利用一些简单周期性单元胞模型（二维的六边形蜂窝模型和三维的立方体模型）来分析二维和三维有序多孔材料的宏观性能指标（杨氏模量、泊松比、单轴和静水屈服强度、断裂韧性、多轴破坏面等），得到了一系列带有未确定参数的半经验性无量纲关系式。对三维的开孔多孔材料得到其杨氏模量、体积模量、单轴和静水屈服强度与其相应的实体材料参数（用下标 s 来表示）和相对密度（即多孔材料宏观密度与其实体材料密度的比值，用 $\bar{\rho}$ 表示）的关系为

$$\frac{E}{E_s} = C_1 \bar{\rho}^2, \quad \frac{\kappa}{E_s} = C_2 \bar{\rho}, \quad \frac{\sigma_U}{\sigma_s} = C_3 \bar{\rho}^{3/2}, \quad \frac{\sigma_H}{\sigma_s} = C_4 \bar{\rho} \quad (1)$$

式中待定常数 $C_1 \sim C_4$ 对不同的泡沫材料需通过大量试验拟合来确定。式(1)经过适当修改后也可用来模拟闭孔材料的弹塑性参数。由于 $C_1 \sim C_4$ 往往无法事先获知, 上述表达式的应用在很大程度上受到了限制。文[5, 6]在分析三维多孔材料的宏观弹性参数时采用了更接近实际情况的 Kelvin 周期性单元胞模型而不是简单的立方体单元胞, 得到了更准确的解析表达式。Zhu 等^[7, 8]还在此基础上分析了多孔材料的蠕变和几何大变形特性, 也得到了封闭的解析表达式。考虑到实际多孔材料的微观组织结构往往不是如图 1 所示的理想周期性结构, 文[9~11]还利用周期性单元胞模型研究了弯曲和非均匀胞壁对宏观弹塑性参数的影响。

近年来, 另一种具有规则微结构的多孔材料——点阵材料也得到人们的重视。同泡沫化材料相比, 它们具有更好的比刚度、比强度和很少的几何缺陷, 而且它们的微结构可根据要求进行设计和制备。点阵材料的微结构往往具有比较好的周期性, 常见的有金字塔型、金刚石型、四面体型以及 Kagome 等多种形式, 可以建立周期性单元胞模型来研究上述点阵材料的宏观力学性能与微结构间的关系^[12, 13]。当多孔材料的宏观几何尺寸与其孔隙大小在同一数量级时, 其材料力学行为表现出明显的尺度效应^[14, 15], 此时需建立基于更高阶的变形理论(如偶应力理论、微极理论等)的细观力学模型来研究多孔材料的本构行为, 目前相关研究仅局限于二维周期性多孔材料的弹性参数研究^[16~18]。针对图 1(a)~(c)中所示的三种二维多孔材料, 我们推导了其微极弹性本构关系,

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{21} \\ m_{13}/l \\ m_{23}/l \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_1 & D_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ D_2 & D_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_3 & D_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_4 & D_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_5 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} e_{11} \\ e_{22} \\ e_{12} \\ e_{21} \\ \chi_{13}l \\ \chi_{23}l \end{Bmatrix} \quad (2)$$

式中 σ_{ij} 和 e_{ij} 分别是微极弹性理论中的应力和应变, m_{ij} 和 χ_{ij} 是偶应力和微转动梯度, D_i 是与微结构相关的材料参数。对图 1(a)所示的六边形蜂窝结构, D_i 为

$$\left. \begin{aligned} D_1 &= \frac{\sqrt{3}E_s}{6} \frac{\eta^2 + 3}{\eta^3 + \eta}, D_2 = \frac{\sqrt{3}E_s}{6} \frac{\eta^2 - 1}{\eta^3 + \eta}, D_3 = \frac{\sqrt{3}E_s}{6\eta^3} \frac{3\eta^2 + 1}{\eta^2 + 1} \\ D_4 &= \frac{\sqrt{3}E_s}{6\eta^3} \frac{\eta^2 - 1}{\eta^2 + 1}, D_5 = \frac{\sqrt{3}E_s}{36\eta^3} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

对图 1(b)所示的四边形蜂窝结构, D_i 为

$$D_1 = \frac{E_s}{\eta}, D_2 = 0, D_3 = \frac{E_s}{\eta^3}, D_4 = 0, D_5 = \frac{E_s}{12\eta^3} \quad (4)$$

对图 1(c)所示的三角形蜂窝结构, D_i 为

$$D_1 = \frac{3\sqrt{3}E_s}{4\eta}, D_2 = \frac{\sqrt{3}E_s}{4\eta}, D_3 = \frac{E_s}{4} \frac{\eta^2 + 2}{\eta^3}, D_4 = \frac{E_s}{4} \frac{\eta^2 - 2}{\eta^3}, D_5 = \frac{\sqrt{3}E_s}{6\eta^3} \quad (5)$$

周期性单元胞模型一般比较简单且容易获得解析解, 但如果用它们来预测泡沫材料的材料常数则存在明显缺陷, 将几乎无一例外地预测多孔材料的静水屈服强度远远超过其单轴屈服强度。以开孔泡沫金属为例, 如果其相对密度为 10%, 则由式(1)可知, 其静水屈服

强度 σ_H 与单轴屈服强度 σ_U 之比为 10.5（此时 C_1 和 C_4 分别取为 0.3 和 1），而试验测量却表明，一般开孔泡沫金属的静水强度与其单轴强度几乎相当^[19]。通过对实际泡沫金属材料的微细观组织和结构的观察可知，它们的微结构并非是规则的，不仅如此，其中往往存在大量的缺陷（如孔壁的弯曲和破裂等）。这些实际多孔材料的非规则、带缺陷的微结构特性是周期性单元胞模型所无法模拟，但却很大程度上影响着多孔材料的宏观性能。为此，人们不得不寻求超级单元胞模型来研究泡沫化多孔材料。

2.1.2 超级单元胞模型

注意到泡沫金属微观组织结构形成过程以及最终形貌与 Voronoi 构型的相似性，Silva 等^[20]利用有限元方法建立了二维的 Voronoi 超级单元胞模型，以模拟开孔泡沫金属的弹塑性参数以及几何缺陷的影响。该模型能较好地描述泡沫金属非规则的微结构，但所预测的静水强度同单轴强度相比仍偏高。超级单元胞模型在理论上应包含尽可能多的不规则微结构（Voronoi cell）以便更好地代表泡沫化材料微细观组织结构的不规则性和得到有代表性的结果，但过多的微结构将会导致计算量过大，因而使得这种模型不具有实际应用价值。文[11]提出了改进的 Voronoi 超级单元胞模型，该模型在微观上仍是不规则的，但在宏观上是周期的，从而可以采用较小的超级单元胞模型来获得有代表性的宏观性能。利用该方法，文[11]系统地研究了各种缺陷对泡沫材料特性的影响，并预测了泡沫金属材料的塑性屈服面可表示为 Mises 等效应力和平均应力空间的一个椭圆面，如图 2 所示。有关闭孔和开孔泡沫金属的多轴实验结果表明^[19]，这一预测结果在以压缩为主的应力空间是正确的。注意到，图 2 中随机杆模型所预测的塑性屈服面也是一个椭圆面，但其假定多孔材料变形机理是胞壁的拉压变形，这与实际情况（应为胞壁的弯曲变形为主）不符，因而预测的椭圆屈服面远大于实际结果。

同二维情况相比，三维 Voronoi 超级单元胞模型的计算量要大得多。Zhu 等^[21]利用有限元方法和 Voronoi 超级单元胞模型计算了弹性开孔泡沫材料的杨氏模量、泊松比和体积模量，发现所得到的结果与采用 Kelvin 周期性单元胞模型得到的解析结果在相对密度较小时相差不大。文[22]将此前的二维 Voronoi 超级单元胞模型[11]推广到三维情况，不仅计算了弹性开孔泡沫化材料的杨氏模量、泊松比和体积模量，还模拟了多轴压缩载荷下其破坏曲面，得到结果与弹性泡沫材料的多轴实验结果相一致，即其宏观破坏的物理机理是微结构的弹性屈曲，也正因为此其破坏曲面满足最大压缩主应力准则，如图 3 所示；文[23]则研究了弹塑性开孔泡沫化材料在比例载荷下的塑性屈服特性，包括其应力—应变曲线、塑性屈服面等。上述开孔 Voronoi 模型均假定构成多孔材料的胞杆是均匀的直杆，并用梁单元来模拟。文[24~26]等研究了非均匀胞杆和非均匀胞壁对开孔和闭孔泡沫材料弹性参数的影响。一般情况下，泡沫化材料压缩变形应力—应变曲线存在明显不同的三个阶段，即初始线性段、较长的平台段和最终的强化段，其中强化段往往是由于胞壁塌陷后胞壁间相互接触而引起的。如需数值模拟多孔材料压缩变形的全过程，则必须在超级单元胞模型计算中引入接触概念，这将大大增加模型的复杂程度和数值计算的工作量。有关二维六边形蜂窝结构和三维开孔泡沫材料的全程压缩模拟可见 Kyriakides 及其合作者的系列工作^[24, 27]，

而文[28]则采用 Particle in Cell (PIC) 方法模拟了真实泡沫材料的全程压缩。需说明的是, 上述超级单元胞模型中有的采用 CT 等方法直接获得实际多孔材料的三维数字图像, 然后用有限元网格生成程序针对所得到的三维数字图像建立真实多孔材料的超级单元胞模型^[25,26, 28]。

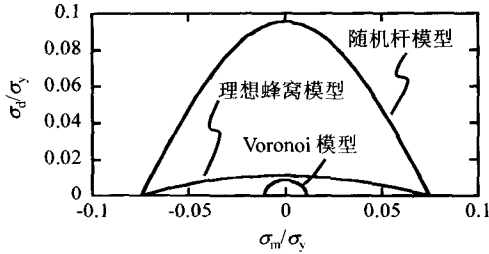


图 2 三种不同模型 (Voronoi 超级单元胞模型、理想六边形蜂窝模型和随机杆模型) 预测的弹塑性泡沫化材料的塑性屈服面形状^[11]

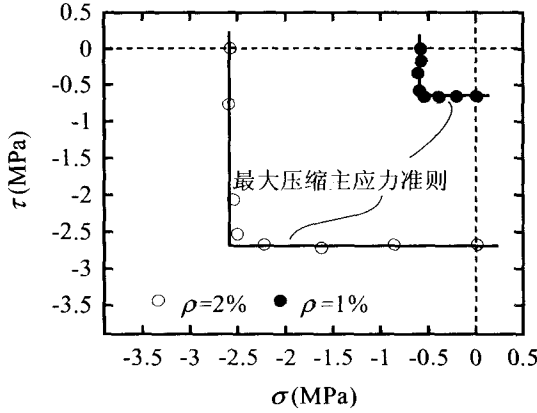


图 3 超级单元胞模型预测的等环向三轴压缩载荷下弹性开孔泡沫化材料破坏曲面结果^[22]。图中符号代表数值计算结果, 线为数值结果的拟合曲线

2.2 宏观唯象本构模型

多孔材料弹塑性本构行为的宏观唯象模型虽然不能像细观力学模型那样能揭示宏观性能与微细观组织结构之间的关系, 但其计算效率往往远高于细观力学模型, 是用于有限元方法指导工程应用设计的首选模型。为此, 人们发展了多种弹塑性唯象本构模型来模拟多孔材料的弹塑性行为。

同经典的 Mises 材料不一样, 多孔材料是典型的塑性可压材料。基于三维开孔立方单元胞模型的分析, Gibson 等^[29]提出了一个多孔材料在多轴载荷下的破坏面模型。在这个模型中, 其破坏面为三维开孔立方单元胞出现塑性屈服、材料在拉伸时的脆性断裂和在压缩时的微结构屈曲三种不同机理引起的破坏面的内包络面。结果表明, 这一模型对某些多孔材料而言与实验结果吻合得较好^[2]。如果仅需模拟多孔材料塑性屈服行为, 其塑性屈服可

以取成如下形式，

$$\pm \frac{\sigma_e}{\sigma_u} + 0.81\bar{\rho} \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_u} \right)^2 = 1 \quad (6)$$

式中 σ_e 和 σ_m 分别是 Mises 等效应力和平均应力。

考虑到泡沫材料在单轴拉伸和压缩状态下强度不等的性质，Miller^[30]建立了类似于 Drucker-Prager 模型的屈服准则，

$$f = \sigma_e - \gamma p + \frac{\alpha'}{d_0 \sigma_c^*} p^2 - d_0 \sigma_c^* = Y \quad (7)$$

式中 $p = -\sigma_m$ 为平均应力，其他材料参数定义可参看文[30]。需注意的是，式(7)所表示的屈服面有不光滑的极点，这将会给数值计算带来困难。另外，Miller 在其模型中采用了非关联流动假设。

Deshpande 和 Fleck^[19]通过闭孔和开孔泡沫金属的多轴压缩试验发现，泡沫金属的塑性屈服面近似为 Mises 等效应力和平均应力空间的一个椭圆面。基于此，他们提出了泡沫金属材料的一个椭圆屈服面准则：

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{\sigma_e^2 + \alpha^2 \sigma_m^2}{1 + (\alpha/3)^2}} = Y \quad (8)$$

式中 $\hat{\sigma}$ 为等效应力， α 为与塑性泊松比 ν^p 相关的塑性压缩因子

$$\alpha^2 = \frac{9(1 - 2\nu^p)}{2(1 + \nu^p)} \quad (9)$$

在上述模型中，均假定多孔材料在应力空间存在比较明显的初始屈服面（也即应力—应变曲线存在十分明显的塑性初始屈服点），这样人们才可以比较方便地从实验或理论结果来确定屈服面函数中的一些材料参数。Sugimura 等^[31]的结果表明，即使在变形的初始阶段泡沫金属内部也会有局部的塑性变形，其应力—应变曲线的初始线形段与塑性变形段之间是光滑过渡的，并没有明显的转折点。因此，即使获得了多轴载荷下的多孔材料应力—应变曲线，确定其屈服函数也不是一件容易事。文[32]基于弹性余能表达式引入两个标量（特征应力和特征应变），结合相应的应力势和屈服流动法则，提出了一套可适用于塑性不可压和塑性可压材料（例如泡沫金属材料）的统一的弹塑性本构模型理论框架。在该理论中，假定应力势具有如下形式，

$$\Phi = \bar{\sigma}^2 + \Phi_1(\bar{\varepsilon}, \sigma_{ij}) - Y(\bar{\varepsilon}) = 0 \quad (10)$$

式中函数 Φ_1 和 Y 可由特定载荷下的应力—应变曲线确定， $\bar{\sigma}$ 和 $\bar{\varepsilon}$ 为特征应力和特征应变，它们与 Mises 等效应力、平均应力、等效应变、体积应变有如下关系

$$\bar{\sigma}^2 = \sigma_e^2 + \beta^2 \sigma_m^2, \quad \bar{\varepsilon}^2 = \varepsilon_e^2 + \varepsilon_v^2 / \beta^2 \quad (11)$$

式中 β 与材料弹性泊松比 ν 有如下关系

$$\beta^2 = \frac{9(1 - 2\nu)}{2(1 + \nu)} \quad (12)$$

此时，其全应变增率可由如下流动法则确定

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\lambda} \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma_{ij}} \quad (13)$$

式中 $\dot{\lambda}$ 需由一致性条件确定。式(13)与经典塑性流动理论不同之处在于它没有区分弹性应变与塑性应变，因而无需人为假定塑性屈服起始点。从这个意义上讲，模型(10)~(13)实质上是一个全量理论，适合于比例载荷或接近于比例载荷情况。Hanssen 等^[33]通过一系列实验来评估泡沫金属的几种增量型弹塑性本构模型，发现现有增量模型都不能准确描述所有加载情况下的响应，它们都存在不同程度的不足，其主要原因在于各种增量型模型中人为定义的屈服面不够准确以及模型无法模拟大变形造成的各向异性和承受拉伸载荷时发生的脆性断裂等。王二恒等^[34]对泡沫铝材料多轴压缩实验结果表明，文[32]提出的模型模拟结果同其他模型结果相比更接近实验结果。此外 Gan 等^[23]有关开孔多孔材料比例载荷下的弹塑性行为细观模型计算也表明，文[32]提出的模型与其他模型相比更能模拟接近细观计算结果，如图 4 所示。

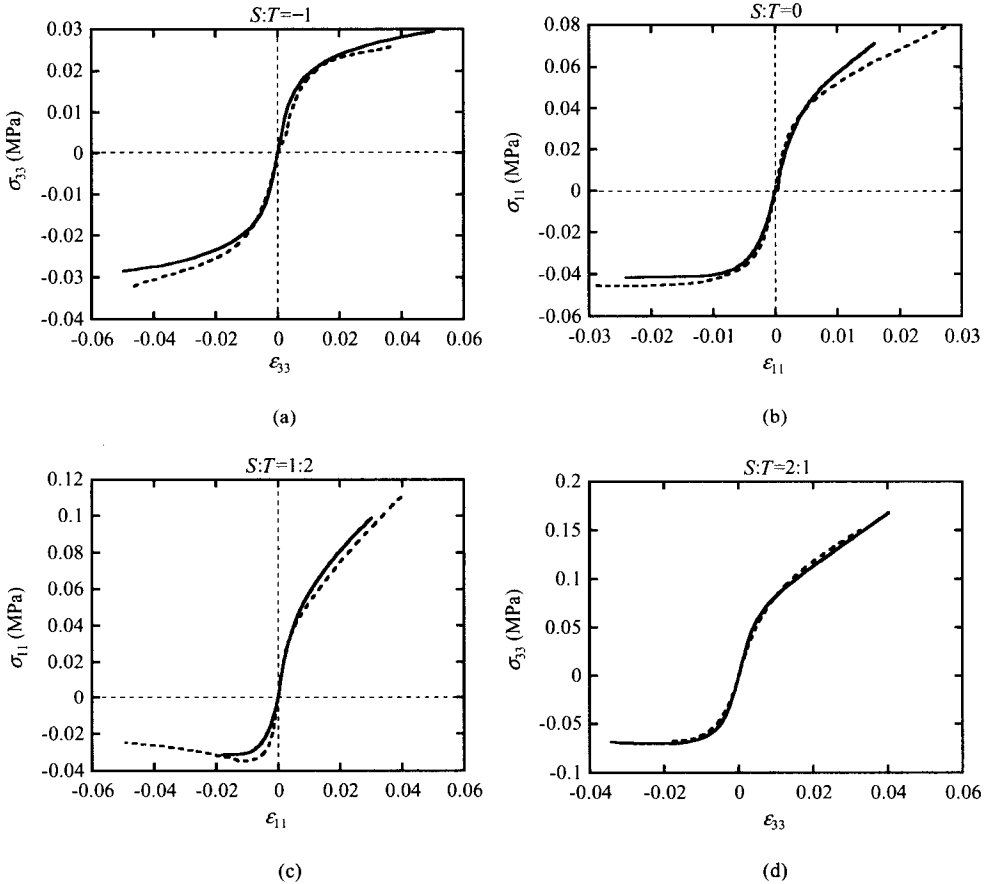


图 4 开孔材料在不同比例等环向三轴载荷下的应力—应变曲线^[23]。图中实线为 Voronoi 超级单元胞细观模型计算结果，虚线为唯象模型(10)的模拟结果， $\sigma_{33}=S$ 和 $\sigma_{11}=\sigma_{22}=T$ 分别为轴向和环向应力。

目前超轻多孔金属材料的率相关本构模型研究较少，而且不同研究小组采用同样实验方法对同一材料的应力—应变响应竟然得到应变率敏感和不敏感两个截然不同的结果^[35~36]。其原因是因为有关泡沫金属的高应变率冲击实验通常因结果过于离散而无法得到确定结果，即使表现出一定的所谓应变率效应也主要是由微细观组织结构的微惯性引起的。

2.3 试验研究

人们对现有的多孔金属材料尤其是泡沫金属已进行了大量的简单受力情况下的实验研究，如单压、单拉、简单剪切等，得到这些材料的弹性杨氏模量、剪切模量、单轴屈服强度等材料参数^[2, 3]，但对复杂的多轴载荷下泡沫金属弹塑性屈服行为包括屈服面的形状及大小的研究工作则比较少^[15, 19, 34, 37, 38]。其中，文[19]发现泡沫金属受压时的塑性屈服面可近似为在 Mises 等效应力和平均应力空间的椭圆面，其单轴屈服强度与静水压强度大致相当；还发现泡沫金属不仅静水可压，其塑性泊松比也很低（约为 0.1，而静水不可压金属的塑性泊松比约为 0.5）；文[15]通过拉—剪耦合实验不仅研究了泡沫金属的宏观多轴本构行为，还系统地讨论了多轴应力下试件尺寸大小对宏观弹塑性特性的影响，发现泡沫金属材料的屈服面大小随其宏观几何特征尺寸变小而变大，但其形状几乎保持不变，如图 5 所示。然而，现有的多轴试验研究仅限于比例加载情况，在大变形时非常重要的非比例加载和变形造成的各向异性行为，则有待于进一步发展。

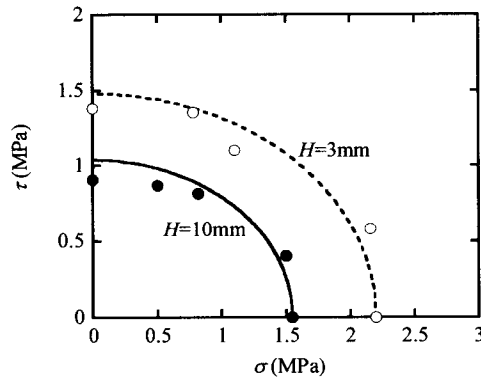


图 5 拉、剪耦合载荷下不同厚度试件对 Alporas 泡沫金属 ($\sigma \sim \tau$) 屈服面的影响^[10]。

图中实心和空心圆圈代表试验点，实线和虚线分别代表模型模拟结果

3 总结

尽管近十年人们在多孔材料的力学性能表征尤其是其本构行为研究方面已开展了大量工作并取得了一定成果，但无论是在微细观力学模型、宏观唯象理论，还是实验领域均远未成熟，主要体现在：（1）超级单元胞细观力学模型不仅可以更好地分析无序多孔金属材料的各种力学特性，还可以用来优化其细观结构和指导材料设计，但目前超级单元胞模型计算往往采用比较简单的几何构型，难以模拟压缩过程中出现的接触现象和拉伸过程中

的脆性断裂，无法实现变形过程的全程模拟。（2）现有宏观唯象本构模型都只能模拟中等应变以下的比例加载情况，无法准确描述材料大变形造成的各向异性现象以及复杂非比例加载情况下的变形，这不仅需要更复杂的理论模型，更要求系统的试验研究。此外，由于泡沫金属材料的微观组织尺寸较大（毫米量级），其材料性能往往存在较明显的尺寸效应，但上述的细观和宏观理论研究却主要是在无法描述尺寸效应的经典连续介质力学理论框架下进行的，更合理的应该是在能描述尺寸效应的非经典的应变梯度理论框架下研究泡沫金属的力学行为。解决上述存在的问题将是今后多孔金属材料本构行为研究的重点。

致谢

感谢国家自然科学基金（10302024、10425210）和国家“973 计划”（2006CB601202）的资助。

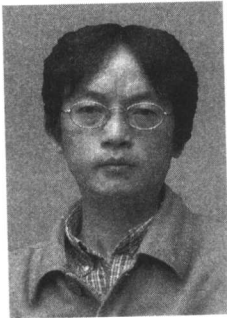
参考文献

1. Banhart J. Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foams. *Prog Mater Sci*, 2001, 46: 559~632
2. Gibson L J, Ashby M F. Cellular Solids: Structure and Properties. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 15~173
3. Ashby M A, Evans A G, Fleck N A, Gibson L J, Hutchinson J W, Wadley H N G. Metal Foams: A Design Guide. Oxford: Butterworth Heinemann, 2000
4. 卢天健, 何德坪, 陈常青, 赵长颖, 方岱宁, 王小林. 多功能超轻多孔金属材料与结构. 力学进展, 2006
5. Zhu H X, Knott J F, Mills N J. Analysis of the elastic properties of open-cell foams with tetrakaidecahedral cells. *J Mech Phys Solids*, 1997, 45: 319~343
6. Warren W E, Kraynik A M. Linear elastic behaviour of a low-density Kelvin foam with open cells. *J Appl Mech*, 1997, 64: 787~794
7. Zhu H X, Mills N J, Knott J F. Analysis of the high strain compression of open-cell foams. *J Mech Phys Solids*, 1997, 45: 319~343
8. Zhu H X, Mills N J. Modelling the creep of open-cell polymer foams. *J Mech Phys Solids*, 1999, 47: 1437~1457
9. Warren W E, Kraynik A M. Foam mechanics: the linear elastic response of two-dimensional spatially periodic cellular materials. *Mech Mater*, 1987, 6: 27~37
10. Grenstedt J L. Influence of wavy imperfections in cell walls on elastic stiffness of cellular solids. *J Mech Phys Solids*, 1998, 46: 29~50
11. Chen C, Lu T J, Fleck N A. Effect of imperfections on the yielding of two-dimensional foams. *J Mech Phys Solids*, 1999, 47: 2235~2272
12. Deshpande V S, Fleck N A, Ashby M F. Effective properties of the octet-truss lattice material. *J Mech Phys Solids*, 2001, 49: 1747~1769
13. Hutchinson R G, Wicks N, Evans A G. Kagome plate structures for actuation. *Int J Solids Struct*, 2003, 40:

14. Andrews E W, Gioux G, Onck P R, Gibson L J. Size effects in ductile cellular solids. Part II: experimental results. *Int J Mech Sci*, 2001, 43: 701~713
15. Chen C, Fleck N A. Size effects in the constrained deformation of metallic foams. *J Mech Phys Solids*, 2002, 50: 955~977
16. Chen J Y, Huang Y, Ortiz M. Fracture analysis of cellular materials: a strain gradient model. *J Mech Phys Solids*, 1998, 46: 789~828
17. Wang X L, Stronge W J. Micropolar theory for two-dimensional stresses in elastic honeycomb. *P Roy Soc A-Math Phys*, 1999, 455: 2091~2116
18. Kumar R S, McDowell D L. Generalized continuum modeling of 2-D periodic cellular solids. *Int J Solids Struct*, 2004, 41: 7399~7422
19. Deshpande V S, Fleck N A. Isotropic constitutive models for metallic foams. *J Mech Phys Solids*, 2000, 48: 1253~1283
20. Silva M J, Hayes W C, Gibson L J. The effect of non-periodic microstructure on the elastic properties of two-dimensional cellular solids. *Int J Mech Sci*, 1995, 37: 1161~1177
21. Zhu H X, Hobdell J R, Windle A H. Effects of cell irregularity on the elastic properties of open-cell foams. *Acta Mater*, 2000, 48: 4893~4900
22. Gan Y X, Chen C, Shen Y P. Three dimensional modeling of the mechanical property of elastomeric open cell foams. *Int J Solids Struct*, 2005, 42: 6628~6642
23. Gan YX, Chen C, Shen Y P. Three dimensional finite element analysis and phenomenological modeling of elasto-plastic open cell foams. (accepted)
24. Gong L, Kyriakides S. Compressive response of open-cell foams. Part II: Initiation and spreading of crushing. *Int J Solids Struct*, 2005, 42: 1381~1399
25. Roberts A P, Garboczi E J. Elastic moduli of model random three-dimensional closed-cell cellular solids. *Acta Mater*, 2001, 49: 189~197
26. Roberts A P, Garboczi E J. Elastic properties of model random three-dimensional open-cell solids. *J Mech Phys Solids*, 2002, 50: 33~55
27. Papka S D, Kyriakides S. In-plane crushing of a polycarbonate honeycomb. *Int J Solids Struct*, 1998, 35: 239~267
28. Brydon A D, Bardenhagen S G, Miller E A, Seidler G T. Simulation of the densification of real open-celled foam microstructures. *J Mech Phys Solids*, 2005, 53: 2638~2660
29. Gibson L J, Ashby M F, Zhang J, Triantafillou T C. Failure surface for cellular materials under multiaxial loads. Part I: Modeling. *Int J Mech Sci*, 1989, 31: 635~663
30. Miller R E. A continuum plasticity model for the constitutive and indentation behaviour of foamed metals. *Int J Mech Sci*, 2000, 42: 729~754
31. Sugimura Y, Meyer J, He M Y, Bart-Smith H, Grenstedt J, Evans A G. On the mechanical performance of closed cell Al alloy foams. *Acta Mater*, 1997, 45: 5245~5259
32. Chen C, Lu T J. A phenomenological framework of constitutive modelling for incompressible and compressible elasto-plastic solids. *Int J Solids Struct*, 2000, 37: 7769~7786
33. Hanssen A G, Hopperstad O S, Langseth M, Ilstad H. Validation of constitutive models applicable to aluminium foams. *Int J Mech Sci*, 2002, 44: 359~406
34. 王二恒, 虞吉林, 王飞, 孙亮. 泡沫铝材料准静态本构关系的理论和实验研究. *力学学报*, 2004, 36:

35. Deshpande V S, Fleck N A. High strain rate compressive behavior of aluminium alloy foams. *Int J Impact Eng*, 1999, 24: 277~298
36. Dannemann K A, Lankford J J. High strain rate compression of closed-cell aluminium foams, *Mat Sci Eng A-Struct*, 2000, A239, 157~164
37. Triantafillou T C, Zhang J, Shercli T L, Gibson L J, Ashby M F. Failure surfaces for cellular materials under multiaxial loads. Part II: Comparison of models with experiment. *Int J Mech Sci*, 1989, 31: 665~678
38. Gioux G, McCormack TM, Gibson LJ. Failure of aluminium foams under multiaxial loads. *Int J Mech Sci*, 1999, 42: 1097~1117

作者简介



陈常青, 男, 1973 年 3 月生于湖南道县, 1993 年毕业于西安交通大学工程力学专业, 1997 年获西安交通大学固体力学专业博士学位, 1997—2001 年在英国剑桥大学留学工作, 2001 年入选西安交通大学“腾飞人才计划”首批特聘教授。现为西安交通大学航天航空学院教授、博士生导师, 《固体力学学报》、《应用力学学报》等期刊编委, 第十届全国青联委员。获全国优秀博士论文、教育部“跨世纪优秀人才”、霍英东高校青年教师奖(研究类二等奖)和国家杰出青年科学基金等奖励或荣誉, 已发表学术论文 40 余篇。

主要研究工作有: (1) 电磁固体介质有限变形基本理论: 研究了有限变形情况下电磁固体介质满足坐标旋转不变性特性的力、电、磁、热等变量、它们之间本构关系的一般形式以及所得变量所必须满足的微分型和积分型控制方程; 利用所建立的有限变形理论分析了一些特定电磁固体介质——压电板壳变形特性, 得到了一些精确分析结果。(2) 铁电单晶和铁电多晶陶瓷多轴多场耦合本构行为研究: 研究了铁电多晶陶瓷材料的多轴力、电耦合本构行为, 获得了其多轴力致和电致破坏面形状; 研究了铁电单晶沿不同晶向的力、电耦合特性以及不同偏压应力和偏电场对其影响。(3) 超轻多孔材料力学行为研究: 提出了建立研究高空隙率的轻质多孔材料宏观性能的解析胞元和超级胞元的细观力学方法, 正确预测了其宏观塑性屈服面的形状和微观缺陷的影响; 通过多轴试验、细观力学模型和宏观唯象理论等方法研究了多孔材料断裂特性、本构行为及尺度效应。

通信地址: 西安交通大学航天航空学院 (710049)

电话: 029-82663626

传真: 029-83237910

Email: cchen@mail.xjtu.edu.cn

微尺度力学及生物力学中几个典型问题的介绍

陈少华*

中国科学院力学研究所 LNM 室, 北京 100080

摘 要 本文扼要介绍了近几年来作者研究领域的三个典型问题, 包括: (1) 解释微尺度下材料表现出尺寸效应的应变梯度理论及对几种典型实验现象的分析; (2) 含中心裂纹和边裂纹的有限宽条带缺陷不敏感特征尺寸; (3) 利用接触力学和断裂力学解释细胞在振荡载荷作用的基底上, 细胞方向重新排列的可能性, 从理论上揭示与细胞方向重新排列相关的两个临界应变值。最后简单介绍一下作者今后的研究兴趣。

关键词 应变梯度, 尺寸效应, 生物材料, 缺陷不敏感, 细胞黏附

1 引言

近年来, 对于微尺度力学研究的一个侧重点在于材料的尺寸效应问题。我们知道在一般的工程或者构件中, 部件或变形所涉及的代表性长度通常大于若干毫米, 连续介质力学已经在这些方面得到广泛的应用。现行微电子工业的兴起, 微米水平下的设计与制造问题, 例如薄膜, 微传感器, 微电子机械系统, 微电子封装等, 这些领域所涉及的长度一般为微米量级, 连续介质力学能否应用? 这就为力学和材料学工作者提出了一个尖锐的问题。试验发现生物现象中很多与力学相关的问题, 例如骨头中的微结构具有缺陷不敏感特性, 破坏时强度能够达到材料的理论强度; 生物分子之间的黏附对环境应力的敏感性; 一些动物或者昆虫吸附在物体的表面, 甚至倒挂在物体的下方, 试验表明是由于范德华力的作用; 更多生物与力学相关的问题, 还需要我们力学工作者和生物学家共同探索。从而了

* 合作者: 中国科学院力学研究所王自强研究员及德国马普金属研究所 H. Gao 教授