

超轻多孔金属材料的多功能特性及应用*

卢天健^{1,2,†} 何德坪³ 陈常青¹ 赵长颖⁴ 方岱宁⁵ 王晓林⁶

¹ 强度与振动教育部重点实验室, 西安交通大学航天航空学院, 西安 710049

² Department of Engineering, University of Cambridge, Cambridge CB2 1PZ, UK

³ 东南大学材料系, 南京 210018

⁴ 西安交通大学能源与动力工程学院, 西安 710049

⁵ 清华大学工程力学系, 北京 100084

⁶ 中国科学院声学研究所, 北京 100080

摘要 超轻多孔金属是近年来随着多样化需求的材料制备以及机械加工技术的迅速发展而出现的一类新颖多功能材料, 是材料的选择及其性能研究的新课题。本文介绍有关多孔金属材料与结构基础研究的国内外研究现状和发展趋势, 涉及材料制备、性能表征等方面, 着重于探讨多孔金属的多功能复合特性及其在国民经济和高技术中的应用。

关键词 多孔金属材料, 制备工艺, 力学行为, 物理波传播, 传热特性

1 引言

超轻多孔金属具有高孔隙率的特点, 其微结构按规则程度可分为无序和有序两大类, 前者包括泡沫化材料(含开孔和闭孔), 而后者主要是点阵材料(开孔)。与传统材料相比, 超轻多孔材料具有千变万化的微结构, 在保持高孔隙率的前提下, 孔径可逐渐由毫米级减小到微米甚至纳米级。因此, 多孔金属具有良好的可设计性, 可以根据不同应用需求在制备前对其微细观结构进行优化设计及多功能、多学科协同设计。

通常, 多孔金属材料单位体积的重量仅是实体材料的1/10或更轻, 且不同构形的微观结构对材料的力学及其它物理特性有显著影响。除了承载, 这些材料还可同时承担其他功能, 如利用材料的多孔特点进行对流换热以满足温度控制要求, 以及吸收降低噪音、屏蔽电磁辐射、冲击能量吸收、阻尼减振等。从1995年开始, 美国国防高等研究署(DARPA)和海军研究局(ONR)共同资助哈佛大学、剑桥大学和麻省理工学院主持的有关超轻金属结构的大型项目, 主要研究泡沫金属的制备、性能及应用。在此基础上,

近年来又对点阵材料(lattice materials)的研发提供强力资助。此外, 美国能源部依托橡树岭国家实验室(Oak Ridge National Laboratory)在2000年启动了Freedom Car项目, 定下了2006年和2012年分别达到汽车自重减轻40%和60%的目标, 而实现该目标的主要技术手段就是开发轻质结构材料。德国在1999年也启动了一个在政府和汽车制造商支持下由几十所大学、研究所参加的有关泡沫金属材料大型研究项目, 侧重于这些材料在汽车工业中的应用前景。在我国, 超轻多孔金属材料的基础研究也逐步得到重视和发展, 这既与我国国民经济和社会可持续发展战略的重大需求紧密相关, 也与当前乃至今后几十年内世界材料科学和材料工程科学及相关领域研究的重要前沿方向相一致。

2 多孔金属的多功能复合特性

超轻多孔金属材料的高孔隙率使其具有独特的多功能复合特性, 包括:

(1) 超轻 超轻多孔材料的密度大大低于传统的

收稿日期: 2005-11-28, 修回日期: 2006-07-17

* 国家973项目(2006CB601201, 2006CB601202, 2006CB601203, 2006CB601204)、高等学校学科创新引智计划(111计划, B06024)、国家自然科学基金会海外青年学者合作研究项目(10328203)及国家自然科学基金(10302024, 10425210, 10572111, 10632060, 50576069, 50471031, 90205005等)资助项目

† E-mail: TJLu@mail.xjtu.edu.cn

固体材料^[1~3]。不同多孔材料的制备方法和工艺迥异,但超轻多孔材料的孔隙率都很高(>80%),有时甚至高达99%。也就是说其密度最小可以只有其基体材料的1%。以多孔泡沫铝为例,如果其孔隙率是90%,那么其密度则只有0.27g/cm³,仅是水密度的1/4。

(2) 高强韧、耐撞击 大量的试验结果表明,多孔金属在承受压应力时其应力-应变曲线上的塑性变形阶段(名义应变在0.5%~75%范围)的应力几乎恒定不变。它们在变形时大量的能量被转变为塑性能,以热量形式耗散,是用作撞击防护的优良材料。此外,多孔金属还是典型的韧性材料,可以防止多孔金属构件存在裂纹和缺陷时发生瞬间的灾难性破坏,有利于人们监测其损伤及发展^[4~6]。例如,泡沫铝合金填充结构在汽车上的应用包括用于正面碰撞的碰撞盒或卡车的下钻碰撞保护器。

(3) 高比强、高比刚度 在航空工业已得到广泛应用的蜂窝铝层合板壳(闭孔)有很好的机械性能,但其价格昂贵(蜂窝铝的国际市场价格是闭孔泡沫铝的100~1000倍^[1~3]),同时其性能有很强的方向性。人们发现制造成本相对低得多的点阵材料的比刚度几乎可与蜂窝材料相媲美(图1),而其比强度甚至更高。同时,由于点阵材料多是开孔结构,它们还具备有蜂窝材料所欠缺的多种其它功能,如强迫对流散热、降噪等。

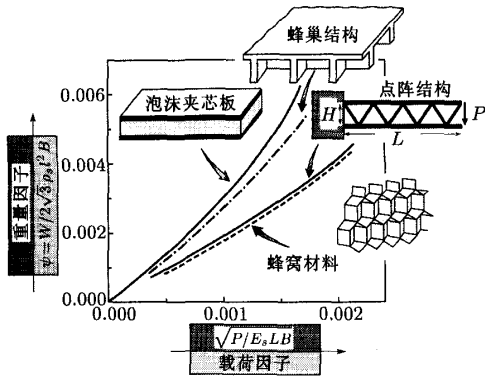


图1 各种最轻重量结构的比较^[7]

(4) 高效散热、隔热 开孔的多孔金属在强迫对流下是优良的传热介质,可以作为承受高密度热流的结构(如空天飞行器、超高速列车)和微电子器件(如高速芯体)的散热装置^[8,9]。此外,在高孔隙率点阵桁架结构中填充隔热纤维(如Safill氧化铝纤维),可达到隔热与承载的双重目的,在航天结构隔热部件、电子设备热防护层、核电厂换热器隔热层等领域有广泛

应用。

(5) 噪声管理 现有的初步研究表明,开孔的泡沫金属和点阵材料的吸声效果良好,而且当孔径在0.1~0.5mm之间时其吸声效果达到最优^[10,11]。与传统吸声材料相比,多孔金属具有高比刚度/强度、无毒、耐腐蚀和耐高温等明显优势^[12]。

(6) 多功能集成 除了上述优点之外,多孔金属的另一特点在于其拥有大量的内部空间,较易实现多功能集成^[12,13]。例如,如果把泡沫镍用作层合板的层芯,由于其具有极高的比表面积,还可同时作为电池的化学反应媒介来提高其化学反应效率和电流密度,这样该材料既可用作结构部件来承受机械载荷,又可以用作储能材料(图2);如果将多孔材料制成层合结构(层芯以冷却剂流通加强散热^[14])且外层辅以更好的耐热(或烧蚀)材料,则可作为航天和空天飞行器中非常重要的高效轻质隔热和散热结构材料;经过微结构优化设计的多孔材料与外表面吸波材料相结合可以更好地在飞机和舰船上实现隐身和降噪;如果在多孔材料的某些部位有选择性地引入传感元件和促动元件,则可以实现机敏结构的各种功能^[13],用于飞行器形貌的主动控制、展开式空间望远镜及卫星反射等等。

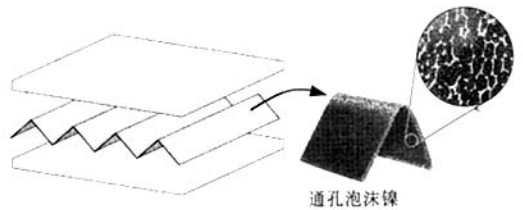


图2 以泡沫镍作为阳极的夹芯结构电池

综上所述,多孔金属既可作为许多应用的结构材料,也可作为一些场合的功能材料,而一般情况下它兼具功能和结构双重作用,是一种性能优异的多功能工程材料,在交通、微电子、海洋采油、航空航天、生物、医疗、建筑等高科技及高技术领域中有着重要的意义。尤其值得指出的是,多孔金属材料 and 结构在高能耗装备(汽车、高速列车、航空航天器、轮船等)的广泛应用,不仅会大幅度降低对常规能源的需求,同时也可减少环境污染。

与世界先进国家相比,我国在该领域起步并不晚,在一些国家目标及学科前沿方面甚至处于领先水平,结合我国在人才、原材料、生产成本的优势,完全能够开发出可以规模应用的、具有自主知识产权的一系列产品及相关技术。例如:

2.1 超薄多孔金属夹心结构

图 3 总结了超轻多孔金属在汽车工业的典型应用。3 个圆表示不同的应用领域，圆外矩形中的内容阐明了与这 3 个应用领域对应的多孔金属的优势特征。理想的应用方法是得到一个重量较轻的控制盘、在发生碰撞的情况下可以进行能量吸收并且具备吸收声音和隔热的功能（见图 3 中 3 个圆的相交部分）。

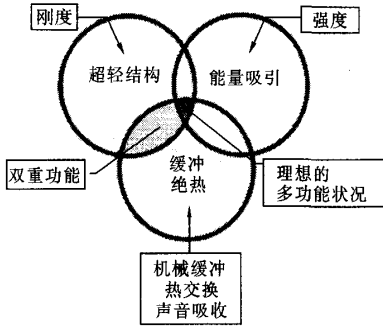


图 3 多孔金属在汽车工业中的应用

以微型不锈钢纤维（长度 $\sim 1\text{mm}$ ，直径小于 $20\mu\text{m}$ ）作层芯、薄不锈钢板（ 0.2mm 厚）作面板而制成的夹心层合结构（图 4），是一种超轻的构造材料，在强度、刚度及延展性方面具有独特的性能；和传统的金属板一样薄和容易成形，比铝更轻，刚性更好，并且材料中空的核心部分使汽车具有出色的减震性、隔音性能和防震的性能。用该材料设计的单片防火墙板替代较厚的橡胶隔离层，可以保护乘客不受发动机舱热量和噪音的影响；除了在制造汽车挡泥板、防护罩和车顶方面代替金属板的明显潜力外，还可以制成管状用作结构部件。

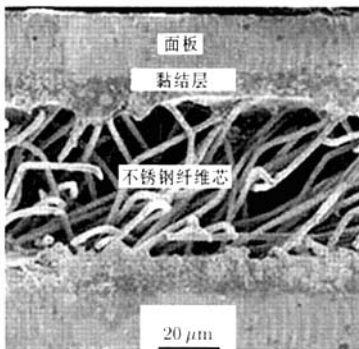


图 4 只有 1.4mm 厚的不锈钢夹芯结构

国内在研究如图 4 所示的层合结构的基础理论和制备工艺方面已有相当基础，但该类材料离实际

工程应用尚有一定距离。采用不锈钢是由于其耐用性和耐腐蚀性，但这并不排除采用其它金属的面板和纤维；如何改变纤维的种类、厚度、长度、角度和密度以满足不同设计要求（强度 / 刚度、能量吸收、降噪等），如何按比例增大或减小核心部分，以及纤维层芯与面板的连接等诸多问题，需要从基础方面理解并加以发展。

2.2 多孔金属降噪材料

作为一种有效的吸音材料，多孔材料已广泛应用于噪声管理。虽然木质纤维板、微穿孔板等也具有较好的降噪功能，但其应用范围经常受到强度和刚度不够高的限制。多孔金属降噪材料具有高比强度、高比刚度、耐腐蚀、防火、防潮、无毒、美观等良好特性^[10~12]，在欧美已被用于大城市高架桥吸声底衬、高速公路隔声屏障、隧道壁墙、室内天花板等。针对高孔隙率通孔铁基（或镍基）泡沫耐高温的优点，西安交通大学和英国剑桥大学、Rolls Royce 公司联合开展了将此材料用于（航空发动机）稀预混合燃烧室降噪的研究^[15]；与传统的燃烧室相比，稀预混合燃烧室的 CO_2 排放量有很大减少（因而为各生产厂商所青睐），但其噪音则有显著增加。为保护稀预混合燃烧室内部结构的安全运作和减少环境污染，必须采取适当措施降噪。此外，常用的木质或化学纤维虽然具有很好的空气吸声效果，但其在水下时由于阻抗不匹配以及水压水温的影响而不具有实用性。多孔金属介质在解决阻抗匹配以及水温水压影响方面则具有不可多得的优势，同时还避免了化学纤维的易污染性。因为轻质高强的特点，在汽车、船舶以及航空飞行结构中的阻尼减震方面，多孔金属也具有相当的应用前景。

2.3 电磁波屏蔽 / 吸收

各种电气、电子设备或者系统一方面对周围电磁干扰十分敏感，另一方面它们本身又会对周围环境发出电磁干扰。此外，电磁波对人类工作和生活环境的污染已成为严重的社会问题。同时，在某些国防、军事等保密场合工作或者设置的无线电设施、雷达、通讯、电缆等电子、电气设施和设备，常常由于电磁波辐射的泄漏而导致国防或者军事信息泄密。

解决这一问题的关键方法之一在于轻质高效电磁波屏蔽吸收材料的设计、制备与应用^[16]。国内近年来在利用轻质多孔材料（包括仿生或遗态多孔材料、金属纤维材料等）对电磁波进行屏蔽、吸收方面已取得了初步成果，但亟需进一步深化该领域的基础和应用研究。

2.4 高效紧凑换热

导热性能很高的由紫铜或纯铝制成的金属泡沫可以用作紧凑热交换器。在这种情况下,需要采用开孔结构;热量可从以强迫对流形式通过金属泡沫的气体或液体中散发或被加热,同时金属泡沫被冷却或被加热。在实验和理论计算的基础上,对泡沫材料的开孔结构进行优化设计,可以使压降减少到最低,从而满足汽车、微电子设备等对紧凑型热交换器的苛刻要求。这类微电子设备往往有很高的能量耗散密度,例如计算机芯片或者能源电子设备。目前针肋排列是标

准的解决此类问题的方案,但研究表明^[17,18],通孔金属泡沫比针肋排列具有更高的热传递效率,说明金属泡沫的热性能更好。

通孔泡沫金属在我国的民用和国防工业具有十分广阔的应用前景,包括:(1)汽车、高速列车、地铁等交通运输工具的散热装置;(2)催化剂支撑载体;(3)噪音管理;(4)燃烧稳定性控制;(5)燃料电池;(6)宇航员空间行走保暖装置,等等。图5所示为通孔泡沫纯铝的一些应用举例。

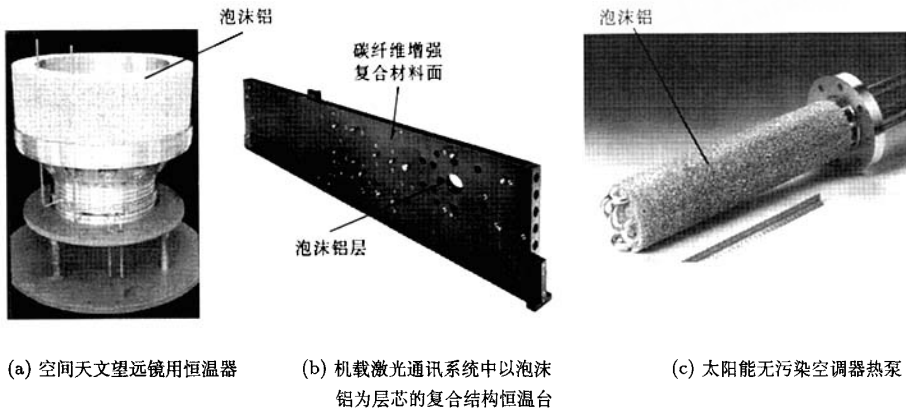


图5 通孔泡沫铝的应用

3 多孔金属: 从制备到应用

多孔金属主要包括无序泡沫金属和有序点阵金属。不同的多孔金属具有不同特性,因而其应用范围有很大不同,制备方法也迥异。对某个具体的应用领域而言,目前面临的主要问题包括:(1)构形:孔隙的类型(开孔或闭孔)、孔隙率、孔径、比表面积、孔型的稳定性;(2)材质:采用金属还是合金,或者所需材料的微孔状态;(3)加工处理:能否按优化构型成型、能否将多孔金属和常规金属或纤维增强复合材料面板结合制成复合结构;(4)经济价值:成本问题、研制的多孔金属能否进行大规模生产。

3.1 闭孔胞状金属

制备闭孔胞状金属的主要方法是熔体泡沫化法。用该方法制备泡沫纯铝和泡沫铝合金(见图6)已经历了50多年的发展历程。1948年Sosnik首先提出利用汞在铝熔体中气化制备泡沫铝的设想^[19]。Elliott发展了这一设想,并于1956年探索了泡沫铝的制备^[20]。20世纪80年代后期,日本学者采用粘度控制等一系列措施成功制备了泡沫纯铝^[21],进入了工业化起步阶段^[22],但由于采用了不恰当的铝合金,一直未能见到泡沫铝合金成功的报导。此外,日本还未有控制孔形状一致性控制孔隙率的概念,其泡沫纯铝的孔结构为多边形而非球形。

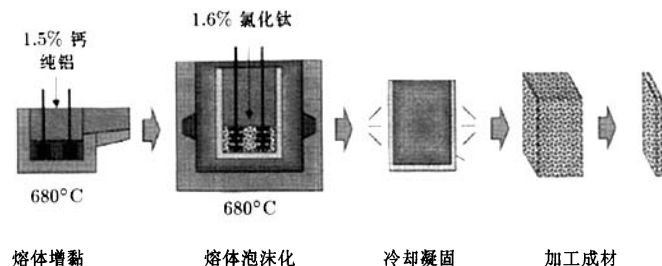


图6 熔体泡沫化制备闭孔胞状金属的示意图

1997年,在美国国防部的资助下,剑桥大学、哈佛大学、普林斯顿大学、麻省理工学院和弗吉尼亚大学等共同合作,对各种多孔金属(主要是日本提供的闭孔泡沫纯铝)层合板壳结构的设计和性能进行了研究并取得了重要进展,但由于各种原因,在制备方面的进展缓慢,无论地面及空间都未有高度均匀孔结构、高成品率泡沫铝成功的报导.但该项目在国际上的影响力很大,对超轻型金属结构成为目前美、英、德、日、中等国的前沿领域起到了积极的推动作用.

从1988年开始,我国东南大学何德坪研究组以制备为中心,历经从好奇心开始的探索,逐步发展到可能目标下的认识研究,进而在具体目标牵引下将认识研究与应用研究相结合的3个阶段,发展了不同的制备、性能研究以适应各种多样化的高技术需求:

(1) 1993年~2000年,获得不控制孔隙率泡沫纯铝成功^[23~25],用于船舶声学需求;(2) 1997年~2002年,在美国波音、格罗曼公司需求及多种高技术需求牵引下,采用多学科渗透的新方法,将制备技术与基础研究相结合,在闭孔泡沫铝合金制备方面取得了重大进展^[26~29]:在同样孔结构条件下,其他与孔结构有关的物理性能相同,同样85%孔隙率泡沫铝合金比泡沫纯铝的压缩屈服强度 σ_c 提高40%,但价格并不昂贵,并成功应用多种高技术,从而引起了国内外的关注和重视;(3) 2000年~2003年,在高新技术需求下发展了一致性控制孔隙率泡沫纯铝.

3.2 通孔泡沫金属

与闭孔泡沫金属相比,世界各国(尤其是我国)对通孔泡沫金属制备研究的起步较晚.通孔泡沫金属按孔结构孔径(d)、孔隙率(P)及通孔度(I)可分

为4大类,其制备方法、孔结构见表1.其中,方法I和方法II在国内有很好的工作基础^[30,31]:东南大学对方法I及方法II已获多项发明专利.

美国ERG公司对方法III已开展了20多年的研究,但并未申请专利;所制备的高孔隙率、高通孔度多孔泡沫纯铝和泡沫铜直到数年前一直属于机密,只为美军方所用.该泡沫金属现在虽已解密,但产量小且价格高昂;我国至今为止尚未见进口.国内就此已开展数年研究,有一定基础,并成功做出了高孔隙率通孔泡沫铝试样,但有关研究工作亟待进一步深化、展开.

方法IV是英国Porvair公司在制备通孔陶瓷泡沫的基础上发展起来的一种成本较低且可大规模生产的工艺方法,可用于制备泡沫铁合金等耐高温多孔金属.该制备方法目前需解决的问题是如何减少泡沫结构中包含的大量因制备工艺造成的微缺陷:这些微缺陷的存在导致了经烧结而成的泡沫骨架的力学、热传导等物理性能不如用熔模法制成的金属泡沫.

在现有条件下,按上述方法制备的通孔泡沫金属具有以下结构特征:

(1) 孔结构具有可调性.根据需求,多孔金属的孔洞形状可以是球形和非球形.

(2) 孔的大小可在一定范围内(0.5~5.5mm)变化.

(3) 较高可调的孔隙率.用渗流法制备的多孔合金,孔隙率为56%~70%以及80%;而用熔模铸造法则可达到96%.

(4) 基体金属的成分和组织可调.基体金属根据需要可选择铝、铜、铁、镍、锌、锡等及其合金.

表 1

方法	孔径 d (mm)	通孔度 I (%)	孔隙率 P (%)
I 熔体在多孔介质中的渗流法	0.5~6	5~15	58~65
II 控制熔体量的渗流法	4~6	20~35	70~90
III 熔模法与渗流方法结合	0.5~5	70~85	92~96
IV 金属浆涂层烧结方法	0.2~5	70~85	90~98

3.3 栅格材料及栅格机电材料

栅格材料(lattice materials,也常被称作点阵材料)是一种新型超轻有序微结构材料.研究结果表明,在同等重量下栅格材料比无序微结构金属泡沫具有更好的力学性能(见图1),而且其结构可按应用要求采用力学原理优化设计,是一种理想的超轻质结构材料.

有序多孔结构制备工艺的关键技术是高孔隙率点阵材料的制备方法.高孔隙率点阵桁架结构由面板和层芯组成.层芯可以采用模塑法、冲压变形法及金属编织法等方法进行加工.采用冲压变形法加工锥体芯,需首先加工带有六边形孔的合金薄板,然后将带孔薄板放入冲槽中,经过冲压成型得到锥体芯结构,其方法如图7所示.最后,将锥体芯与合金面板

通过钎焊或其它方式连接,即制成了超轻多孔有序夹芯结构.必须强调的是,层芯的选择取决于应用的需要和优化设计的结果,绝非仅限于锥体结构^[14].

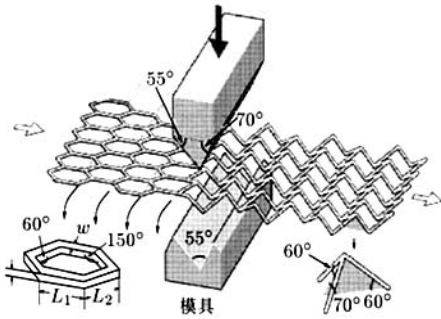


图7 点阵桁架锥体芯加工工艺示意图

3.3.1 静不定结构

如果高刚度、高强度是首要设计参数(如航空/航天器外壳结构),研究表明静不定有序微结构多孔材料是作为层合板层芯的首选,但需针对各种宏观和局部的破坏模式对面板和层芯材料同时进行最轻量化设计以达到预定的承载目标.例如,在航天器返回大气层时,由于摩擦而引起的表面温度极高,必须采取有效的冷却措施散热,但同时又不能过多增加系统重量.已有的研究重点之一是建立合理的目标函数以及相关的力学和热传递理论,对层状结构的承载和散热能力进行同步优化设计.多孔层芯材料除了承载,在强迫对流条件下自身也是优良的紧凑热交换器,因而不必求助于附加冷却装置.这种材料由于结构的有序性,导致流动和传热特性呈现出周期性规律,因此在研究方法与内容上又与金属泡沫有所区别.研究发现,在满足刚度和强度基础上设计而成的最轻量化结构,其孔隙率通常大于90%,且孔径大而孔壁薄,并非用于散热的最佳结构^[32].随后对多种有序点阵材料进行了单相对流换热的理论和实验研究^[33],结果显示其具有良好的传热效果.

3.3.2 静定结构

研究显示^[34],如果要求承载结构同时具有显著的促动(actuation)功能,则须选择具有静定微结构的材料作为层芯并对层合结构进行优化设计,以在规定承载下达到最大位移.面板则由智能材料(如形状记忆合金)制成.此外,也可考虑层芯多孔材料自身的多功能性,采用分布其间的微电子元件及晶体管对不同功能进行操控并提供相应的功率.根据Maxwell准则,静定材料必须满足 $m = 3j - b$ 的关系式,其中 m 和 j 分别是杆件和结点总数.每一结点

连接3个不在同一平面的杆件而形成三维静定杆件材料的单元体.上述静定材料不含内应力.更重要的是,未促动杆件不会阻碍某些杆件因促动而引致的伸长(或缩短).换言之,静定材料清除了产生冗余应变及相应能耗的机制,是作为执行机构的理想材料.在外载作用下,静定材料的另一明显优势是很简便地计算单一杆件内的应力和应变,从而降低了对系统进行优化设计的困难度.但是,在某些载荷情况下,上述静定杆件材料的刚度较低.

如果系统自备能源,而且预先将传递功率的晶体管网络分置于面板内,则可局部促动部分杆件以实现宏观结构的弯曲和扭转变形,并使承受相当载荷或约束力的部位也能达到规定位移(图8).因此,上述新型机电材料与其它促动机构的不同之处主要在于结构的承载能力和多元促动模式在后者受到同等重视.促动模式的多样化取决于功率来源、静定杆件层芯材料和面板的性能总比、促动应变大小以及层芯材料的微结构形貌.

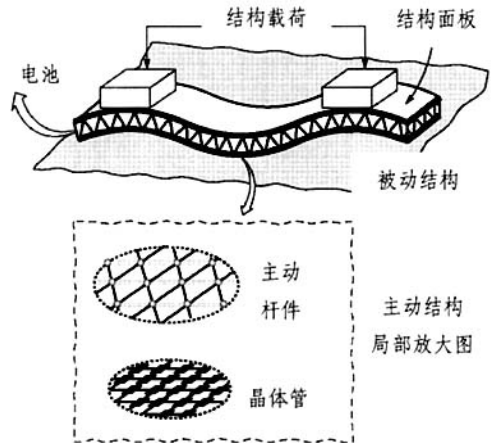


图8 轻质多功能机电材料的示意图

3.4 超轻多孔复合材料夹层结构

夹层板(壳)是由两块高强度的薄表层(承载层)和充填其中用以保证两块表层共同工作的轻质中间层(夹芯)所组成.表层通常采用金属、复合材料层板、硬塑料等.夹芯可以采用塑料或金属泡沫、栅格材料、蜂窝铝、波纹金属薄片等.这样的结构具有重量轻、强度高、刚性大的特点.若适当选择表层和夹层,还可以获得良好的抗撞击、抗振动、隔热、隔音及其它必要的性能(如电性能等).大量理论和实验结果表明,轻质夹芯的存在使夹层板的高度比面板高出几倍;其剖面的惯性矩随之成4次方比增大,且面板有夹芯支持不易失稳^[3].面板可以很薄,与实心

板相比要轻得多而且刚度大, 减重效果极其明显, 是一种高效结构材料, 在汽车、列车、航空、造船、海洋采油等行业有广泛应用 [3]。例如, 瑞典 Volvo 公司于 1998 年开发了一种夹心结构的超轻不锈钢板材 (HSSA), 将切割成 1 mm 长度的不锈钢纤维 (直径小于 20 μm) 在静电作用下垂直粘附在预先涂有环氧树脂的薄不锈钢面板上; 随后英国和美国的科学家开始了深入的研究, 探索 HSSA 的性能和潜在的用途 [35]。该材料工艺复杂, 成本较高, 而且力学性能没有充分发挥出该结构的优势。

3.5 材料成形加工技术的现状和发展趋势

制造技术可分为加工制造和成形制造技术。为了生产高精度、高质量、高效率的产品, 材料正由单一的传统型向复合型、多功能型发展; 材料成形和加工制造技术也逐渐综合化、多样化、柔性化、多学科化。轻量化、精确化、高效化已成为材料成形加工技术的重要发展方向 [36]。

目前的材料成形方法主要有 3 种, 其原理、实现工艺、技术优劣见表 2。

快速成型技术采用材料累加的原理制造三维结构, 可以实现任意结构的自由制造。它可以直接由三维 CAD 数据成型出三维实体, 在复杂形状的快速而

精确成型上具有其它加工方法无法比拟的优点: (1) 快速性; (2) 高度柔性: 无需工夹具, 无须生产准备, 系统不作任何改变和调整即可成型不同类型的结构; (3) 与复杂程度无关性; (4) 高度集成化: 在一台设备上完成所有加工。

快速成型目前的主要问题是材料停留在高分子材料的制造。有序多孔金属结构的制造可以通过直接成型或间接成型的方法实现:

(1) 直接成型方法: 金属材料直接成型技术, 采用微束等离子焊, 直接融化金属材料堆积, 根据 CAD 模型控制精确的材料叠加过程, 对材料的堆积过程在数量上和成形能量上进行精确的控制, 直接金属成形具有复杂形状结构成形的能力。快速成型技术采用增材制造的原理, 逐点、逐层堆砌成形的制造特点使它能够制造几何外形复杂和大尺度变化的多孔结构, 为变材质和变功能零件制造手段, 成为一种成形金属基体连续或非连续有序多孔结构的制造方法。

(2) 间接成型方法: 间接方法采用快速成型 + 精密铸造方法。先利用快速成型原型为母性, 外表面挂陶瓷浆形成模壳, 经高温焙烧使其固化, 高分子原型气化消失形成型壳, 然后在陶瓷型壳中浇铸金属熔液形成金属有序多孔结构。西安交通大学卢天健课题组采用间接成型的方法研制的点阵金属结构见图 9。

表 2

成形方法	原理	工艺方法	优势	劣势
材料去除成形	材料增量 $\Delta M < 0$	车、铣、刨	精度高	加工慢, 有加工死区
材料等量成形	材料增量 $\Delta M = 0$	铸、锻	批量速度快	精度低, 集成度低, 工艺繁琐
材料累加成形	材料增量 $\Delta M > 0$	快速成型	无复杂程度限制 单件速度快 设备和工艺集成	精度低



图 9 以间接成型制造技术加工的超轻点阵金属结构

4 多孔金属材料的性能表征

4.1 多孔金属材料的静态及准静态力学行为

多功能超轻多孔金属材料的研究重点之一是有其宏观性能和微结构之间定量关系, 只有充分认

识微结构与性能之间关系以至达到通过微结构来推断预测其性能, 才能使其应用更加广泛、更加安全。

对于孔隙率较低 (一般在 40% 以下) 的多孔金属, 其力学性能已经得到了较为广泛的研究, 形成了较为成熟和深入的系统性理论。而对于高孔隙率 (大于 70%)

的多孔金属, 泡沫金属力学性能的研究较多, 而各种点阵材料的力学性能研究较少; 静态力学性能研究较多, 动态力学性能研究较少。

对多孔材料在准静态加载条件下的力学性能研究, 国内外已开展了大量工作^[3,37~64]。无序多孔材料(泡沫化材料)的一个重要特点就是它们细观组织结构的尺寸在亚毫米或毫米量级, 比较容易识别, 而且其基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。Gibson等^[3]详细地介绍了如何建立简单的细观力学模型来分析高孔隙率材料的宏观性能指标, 得到了一系列半经验的无量纲关系式。由于这些关系式中存在需大量试验结果才能确定的经验参数, 其应用受到了限制。此后, 不少研究者分别建立了基于二维和三维的细观力学模型, 更准确地分析了细观结构较为规则的开孔泡沫化材料的弹塑性变形。文^[37, 38]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等人^[39]还在此基础上分析了多孔材料的几何大变形特性, 并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理想周期性结构, 文^[40~42]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^[43,44]。

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化材料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。这些实际多孔材料中的非规则、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。为了准确地模拟实际材料中因制备工艺而造成的各种类型的微缺陷, Silva等^[45]利用有限元方法建立了二维的超级单元胞模型(super cell)来模拟开孔泡沫金属的弹塑性参数以及几何缺陷的影响。该模型能较好地模拟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。Chen等^[42]指出了以前建立的细观力学模型的不合理之处, 提出了如何建立合理的泡沫材料细观力学模型的基本方法, 并利用该方法建立了超级单元胞分析二维泡沫材料的弹塑性特性, 得到了静水压强度和单轴强度相当的正确结论。利用该方法, Chen等^[42]还系统地研究了各种缺陷对泡沫材料材料特性的影响, 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。有关闭孔和开孔泡沫金属的多轴实验结果表明, 这一预测结果在以压缩为主的应力空间是正确的。

Chen等^[42]的方法还被用来建立研究多孔材料的三维超级单元胞。Zhu等^[46]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、波松比和体积模量, 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。Gan等^[47]将此前的二维Voronoi超级单元胞模型^[42]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、波松比和体积模量, 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。文^[48~50]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-应变曲线存在明显的3个不同阶段, 即初始的线性段、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, 这将极大地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及其合作者的一系列工作(例如, 文^[48,51]), 而Brydon等^[52]则采用PIC (particle in cell)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^[49,50,52]。

需强调的是, 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(约为毫米量级), 其材料性能存在显著的尺度效应, 而且试验研究也证实了多孔材料中的这种尺度效应^[53,54]。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, 目前相关的研

研究仅局限于二维周期性多孔材料的弹性参数研究^[55~57]。细观力学模型不仅可以用来分析多孔金属的各种力学特性，还可以用来优化材料的细观组织和结构，指导材料设计，以充分发挥材料的特性。这通常需要经过对一系列细观结构的分析（往往是有限元分析），才能得到最优的结果。为此，Sigmund等^[58]提出了一种拓扑优化方法来实现这一目标，对一系列的优化指标（如刚度、泊松比、热胀系数等）都得到了很好的结果。这方面的工作目前也局限于二维情况。

对轻质多孔金属材料的力学性能开展研究，一方面是为了改进材料制备工艺，以求得到性能更优良的材料，另一方面则是为了方便它们在工程中的应用，以利于设计多孔材料构件。由于这些构件通常比较复杂，设计时人们不得不寻求一些数值方法（如有限元）来研究其变形和破坏情形。宏观唯象本构理论由于比较简单，应用效率高，往往是数值方法中的首选模型。因此，建立合理的宏观唯象多轴本构关系一直是人们的研究重点。在已有试验和细观理论研究基础上，人们建立了复杂程度不同的三维弹塑性本构理论^[59~62]。Hanssen等^[63]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及承受拉伸载荷时发生的脆性断裂等等。王二恒等^[64]对泡沫铝材料多轴压缩实验结果表明，Chen等^[62]提出的模型模拟结果同其它模型结果相比更接近实验结果。

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^[65,66]。其原因是因为有关泡沫金属的高应变率冲击实验因结果过于离散而无法得到确定结果。事实上，人们发现泡沫金属所表现的应变率效应主要是由微细观组织结构的微惯性引起的^[67]。

4.2 多孔材料的动态力学特性及耐撞性

在实际应用中，多孔金属由于其特殊的理化性能和力学性能，特别是可承受基本恒定、低水平压应力而产生大范围的变形特征，对于许多包装、冲击缓冲系统最为理想。通过选择基体材料、孔隙结构形貌和孔隙率来控制变形特征，可使多孔金属成为理想的吸能材料。同有机泡沫材料相比，如果实际应用需要较高的破坏应力，并要求吸收同样或更多的能量，多

孔金属很有优势，在汽车、航空航天、铁路运输、造船、建筑、包装等行业有广泛应用前景。因此，多孔金属在高变形速率下的动态力学性能、破坏机理和耐撞性研究对于其在上述领域的应用发展具有重要意义。此外，强动载荷作用下材料的力学行为研究以及材料的强动载荷性能的确是应用新结构材料的重要前提之一，尤其对新材料在军事和防恐怖领域中的应用具有重要意义。例如：超轻多孔材料和结构可应用于武器装备以及重要建筑结构等设施的防护装甲，以抵抗剧烈爆炸产生的气体冲击波、固体中的应力波、液体中的激波、弹丸的高速碰撞等在内的各类强冲击载荷的打击（图10）。

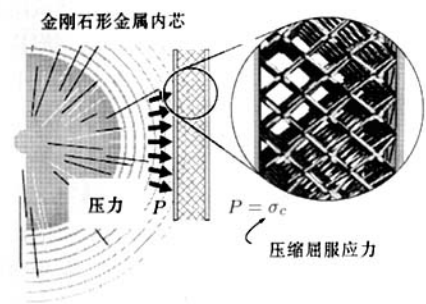


图10 多孔金属抵抗冲击波示意图

与传统材料一样，应力波的传播和结构的动态响应是多孔材料冲击动力学的两类基本问题。前者研究物体局部扰动及其传播问题，它将动态响应作为一个过程来研究；后者忽略扰动传播过程，直接研究结构的变形、断裂及其与时间的关系。

4.2.1 多孔金属材料 and 结构的动态响应

目前国内外对多孔介质的动力学性能已有不少研究，但绝大多数研究的重点在于第2类基本问题，即直接研究多孔介质在冲击下的变形、断裂和失效准则。例如，Deshpande等^[68]研究了蛋壳型金属夹心结构在轴向压力作用下的破坏机理及吸能特性；Tan等^[69]通过准静态、动态实验及理论分析研究了具有不同开口形式的单根铝管的惯性对其组成的蜂窝铝构件动态冲击挤压弯折吸能特性的影响；孙悦等^[70,71]利用中等密度的多孔铝烧结体进行的中、低静压全程加载-卸载实验表明，泡沫铝在静压下具有较高的吸能性，吸能效率较高。Lapatnikov等^[72]采用解析的方法和有限元计算研究了静止泡沫铝受平板高速冲击时的动态特性和能量吸收问题，指出当撞击速度与金属泡沫的声速及其构成材料的声速相比处于不同范围时，材料的动态响应具有本质的

差别。Strong 等^[73]发展了理论模型来解释多孔介质结构的力学行为,例如用一维冲击波理论来刻画塑性区前沿在多孔结构中的传播。此外,虞吉林^[74]对泡沫铝的冲击力学性能也进行了实验和数值研究。

通常,多孔金属的模量和强度随温度的升高而降低,而增大应变速率不会影响其模量,但会增加其强度。这些效果直接关系到温度和孔壁性能的应变速率相依性,是制备多孔金属所用材料的内性质。但多孔金属的孔穴几乎总是包含有流体,如空气或水。当其变形时,孔穴中的流体会受到压缩(若孔穴为闭合的)或从1个孔穴流向另1个孔穴(若它们是开口的),而这又引入了对温度和应变速率的新的依赖性。Deshpande 等^[75]和 Dannemann 等^[76]用分离式 Hopkinson 压杆分别对泡沫铝做了冲击压缩试验,他们采用同样的实验技术,但对同一种泡沫铝试件却得出应变率相关和应变率无关两个截然不同的结论!胡时胜等^[77]在对这一实验技术做出改进的基础上,较系统地研究了泡沫材料的动静态力学性能,对泡沫铝的应变率敏感性进行了讨论,认定这种材料是应变率敏感材料,这种敏感性主要是由于泡孔的变形特性产生的。泡沫材料变形的局部化、微观惯性和致密性导致其压垮应力明显提高,基体的应变率效应及泡孔的形状大小并不能对泡沫材料应变率敏感性起主导作用。

Hanssen 等^[78]采用现场试验的方法研究了泡沫铝平板对炸药爆炸产生的气体冲击波的响应,发现了材料透射能量增大的奇异行为,并将其归结为是由于材料变形储能所引起的,但没有给出完整的理论分析。Guruprasad 等^[79]提出了牺牲性覆层设计概念,建立了以超轻多孔材料和结构为主要结构材料进行防护装甲设计的一般性准则。Qiu 等^[80]建立了金属夹芯梁、板构件在爆炸冲击荷载作用下变形分析的解析模型,分析了夹芯梁在爆炸荷载作用下的变形历程并和有限元方法做了对比分析。结果表明,材料的应变硬化性对夹芯梁构件的性能影响可以忽略,夹芯层的压缩强度对夹芯梁构件的整体动力反应有很小的影响。Xue 等^[81]对爆炸冲击荷载作用下夹芯层板和同样重量的实体板抗冲击性能进行了对比分析。针对夹芯层板的角锥桁架、矩形蜂窝及折板3种芯层几何形式,对每种夹芯层板的重量进行了优化研究,其目标参数包括面层的厚度、芯层单元的高跨比及相对密度等,优化设计的夹芯层板能承受比同样重量的实体板强得多的爆炸冲击波,有显著优越的吸能效果。王海福等^[82]研究了爆炸荷载作用下,孔隙度和粒度参数对多孔铁中冲击波压力特性的影响。

Xue 等^[83]讨论和比较了夹芯层板和对应的实体板在爆炸冲击波作用下的抗冲击性能,指出芯层在何种条件下可能使夹芯层板具有优越的抗冲击性能是今后进一步研究的方向。

4.2.2 应力波在多孔介质中的传播

与多孔介质在冲击下的变形、断裂和失效等研究相比,国内外对涉及应力波的扰动和传播问题的研究成果较少。文献[84~88]对由多孔介质构成夹层板的动态响应进行了研究,包括用理论模型得出的设计公式和尺寸优化方法,用均值泡沫的本构关系和三维模型进行的数值计算,以及在某些冲击载荷作用下的实验结果。这些理论模型大多采用动量守恒、能量守恒直接得出动态激励下的变形,并未考虑其中的应力波传播问题。因为载荷均为垂直于板的法线方向的激励,而夹层板结构在厚度方向的尺度比其他两个方向小很多,应力波在很短的时间内即达到均匀状态。在实际应用中,如果多孔结构在激励方向的尺度较大,应力波传播问题将更需要引起重视。

多孔介质中波的传播问题本身比较复杂。除线性的弹性波外,非线性的弹性波和塑性波也会有相当重要的作用。首先,单纯弹性波在非均匀介质里传播,会出现反射、折射和透射。在多孔介质中,应力波尤其会发生大量的折射和反射,其传播方向也在不断发生改变。非均匀介质中的波动方程在原则上与均匀介质中的形式相同,但方程中的材料属性不再是常数而是坐标的函数。由于波动方程中含有材料属性对坐标的偏导数,问题比均匀的各向同性介质中的运动微分方程更为复杂。如果有序多孔介质的材料属性和坐标的关系还可以归纳的话,无序多孔介质的材料属性随坐标的变化则很难预测,因而很难求得问题的精确解。其次,应力波在非完全弹性介质中传播的同时会产生衰减:其机械能在传播过程中部分地转化为热能或其他形式的能量而被耗散。由于构成多孔介质的材料在很多情况下不能完全作为弹性介质来处理(尤其是作为减震、防冲击的包装、防护材料,其应力波和能量衰减是其设计主要目标),因此需要考虑应力波的衰减问题。此外,一般只有在应力不太大的情况下,弹性波和其衰减理论才有效。在大多数多孔介质的应力波问题中,相对于结构,应力波的强度很大,超出了材料的弹性范围,于是就出现了塑性波。如果构成多孔介质的材料本身就不是线性的,则还需要考虑非线性应力-应变规律下波的传播问题。例如,在速度较高的激励作用下,受激励处的介质在高应力作用下一般不能当作弹性介质来处理。

多孔介质中应力波的传播问题还需要考虑其宏观等效关系的复杂性。实验表明,作为具有微结构的轻质材料,多孔介质存在明显的尺度效应。首先,它

具有自身微结构的尺度,如泡沫材料中孔的尺寸,以及构成桁架、格栅、点阵结构中的板和杆的尺寸.针对这种多孔介质的分析,多数是将其先等效为宏观均质材料,然后在设计使用中不再考虑微结构的影响.然而,微结构自身尺度的存在使多孔材料在受载时由于载荷尺度不同有可能会出现尺度效应.若外载尺度与构成多孔介质的微尺度相当,或应力波、冲击波的波长与微尺度相当,将多孔介质等效为宏观连续体的假设就不再成立.

应变梯度理论是从力学上分析材料尺度效应的较为流行的方法.作为一种高阶梯度理论,在应变梯度理论材料的本构关系中,材料的应力不仅与应变相关,还与应变的梯度相关.因此,与经典材料相比,梯度材料多了一个特征长度.应变梯度理论有多种,其中文献 [88~91] 从几何必需位错观点考虑塑性变形出发,发展了两种应变梯度塑性理论:(1)只考虑旋转梯度的偶应力理论;(2)同时考虑旋转和拉伸梯度的应变梯度理论.对应力波在多孔介质中的传播问题,一个思路是将无序或有序多孔介质等效为具有应变梯度效应的均质材料,然后结合波动方程,对问题进行求解.采用应变梯度理论作多孔介质的宏观力学等效分析,需要解决如何界定多孔介质的材料特征尺度及其对材料宏观性能的影响等难点.无论是均匀的各向同性介质,或是非均匀的多孔介质,利用应变梯度理论来研究应力波问题在国内外尚属空白.

格栅结构、蜂窝结构、点阵结构通常是周期性结构,或者是可以近似地当作周期性结构.针对周期性系统波动性质的研究,尤其是在物理学界,已经有300年的历史 [92].周期性结构动力学的系统分析则开始于1953年的针对工程桁架的研究 [93~95];利用传递矩阵、增阶谱有限元、简谐分析等方法 [96~98] 研究宏观周期结构(如飞机机舱、输油管道和高层建筑等)的波动问题目前已有相当基础.研究表明,在周期性介质中传播的波存在着传播区域和消减区域;在某些特定的区域里,多方向的反射干涉会导致波的削减.此外,噪音和振动沿这类结构传播时,会在缺陷或者应力集中处引起疲劳乃至破坏.有些外部激励可以传播很远乃至整个结构;而另外一些则可能产生局部振动.根据正确的应力波传播分析结果,可以设计结构避开危险激励,控制能量流通量和流动路径,使这部分激励产生的能量在适当的部位耗散掉.这是力学中一个有望与控制有益结合的领域,具有理论上探索的价值和应用上的前景.对于金属泡沫这样的胞元随机分布的材料,可以利用统计规律从整体特性出发研究其动力学特性.而对于像点阵材料这样的高度周期化的结构材料,通过对其相对简单的有序微结构进行研究,不仅可以进行更加细致的分析以实现更高的目标,同时还能够有效的进行人为控制.与宏观周期

性结构不同,构成格栅结构、蜂窝结构、点阵结构的微结构尺度更小,且不连续性更强,因此多数情况下不能作为一维、二维波的传播问题来分析.

研究波在周期性介质中的传播问题是决定超轻多孔材料在航天航空领域的实际应用的必要条件.对轻质材料受冲击载荷的分析能够指导轻质材料的设计与结构优化,从而在保持抗冲击能力的同时达到空天飞行器的减重的目的.同时,深入研究周期性材料中机械波的传播能够有效的防止大型机翼的有害自振,为实现结构的有效控制提供理论依据.例如,在实际应用中,空天飞行器独特的服役力学环境要求机体构件(比如机翼、机身这类可能遭遇不定向突发载荷的结构)具有良好的抗冲击和减振特性.此外,军用装甲等武器表面上的爆炸应力以及波浪对船舶或近海结构的冲击等问题也要求深入研究构件材料的抗冲击特性和减振性能.由于冲击载荷的作用时间通常较短,各个子结构在各个时段的响应不尽相同,因此材料对外载荷的动态响应必须通过应力波在周期介质中的传播问题来研究.同样,考虑到减振,尤其是在卫星的轻质太阳能帆板等大尺寸构件中,振动不能很快传递到结构末端的情况下,周期性结构中机械波的传播问题就显得特别重要.

由上可见,超轻多孔金属材料 and 结构的吸能机理以及应力波在多孔金属的传播、衰减等动态特性的研究已逐步成为当前学术研究的热点领域.需要指出的是,这一领域的研究还处于起步阶段,研究工作还很不完善,多数工作尚处于实验阶段,理论研究模型大多都较简单,距实际应用问题的解决还有相当距离.此外,多数对金属多孔材料抗冲击反应的分析是建立在静态基础上的,未考虑应变率相关效应带来的影响,很难给出整个材料的动态数据模型.如何进行金属多孔材料结构在冲击荷载下的强度分析和破坏过程的研究,建立相关的金属多孔材料本构关系及破坏判据,需要开展进一步深入研究.

4.3 物理波在多孔材料中的传播和吸收

4.3.1 声波

多孔材料通常由固体和流体两相构成:含孔隙的多孔固体组成材料的骨架,而流体(液体或气体)可在相互连通的孔隙中运动.声波进入(通孔)多孔材料后引起空气振动,由于振动受到曲折的孔隙壁的阻挡,空气与孔隙壁发生摩擦造成能量损失.低频时声波的波长较大,能量较小,碰到孔隙壁时发生反射、折射,若是弹性碰撞则能量损失小,吸声系数低.高频声波的能量较大,进入多孔金属后与孔壁发生相撞,因其振动幅值大,有可能发生非弹性碰撞,能量损耗大,加之反射或折射后的声波仍然具有较高能量,与孔隙壁发生二次或多次以上的非弹性碰撞,经过多次

反射、折射之后,原有入射声波的大部分能量变成热能散失到环境中。

不同孔隙尺寸、孔隙度的多孔材料对声波传播的影响及吸声特性有很大差别。孔隙较大时,声波进入后不容易发生二次或多次反复碰撞,因而能量损失较少。但当孔隙细小时,声波发生多次碰撞的可能性增加,每次反射、折射都要消耗一定能量。因此,孔径大的多孔金属不如孔径小的吸收的能量多。但是,孔径尺寸也不能无限减小,因为大部分声波有可能在未进入多孔材料前即已反射。文献 [10,15] 的研究结果表明,孔径尺寸在亚毫米量级为最佳。对于孔隙尺寸大小相同的多孔金属,由于孔隙率对多孔金属吸声性能的影响,其吸声效果也不相同,甚至有较大差别。总的来说,孔隙率越大,多孔金属的吸声系数越大。这主要是因为孔隙度越大,孔隙的曲折度越大,内部通道越复杂。

研究声波在多孔介质中的传播特性,主要考虑两个方面:一是孔隙中填充介质里的波的传播,一是多孔介质骨架内的弹性波传播。同时考虑两者的传播问题一般采用 Biot 发展的理论^[99],即构造连续等效介质的本构方程及其波动问题的控制方程,引进流、固两相间的相对运动耗散和惯性耦合。该理论预测声波在饱和多孔介质中的传播有 3 种形式,即两种纵波(双波结构)和一种横波。Plona^[100]的超声波实验对 Biot 预测的双波结构提供了有力支持。尽管 Biot 模型正确地预测了多孔介质中的双波结构,但该模型源于经验而显粗糙,例如没有考虑温度的影响和组分密度的变化,尤其是忽略了孔隙度(流体的体积分数)在波传播过程中的变化。虽然任何描述多孔材料动力响应的多孔介质模型都必须反映双波结构这一基本特征,但如何建立一个描述多孔介质中波传播过程的完整热力学模型历来是争论热点,迄今尚没有一种统一的构造方式被广泛接受。

目前的多孔介质理论大都采用连续介质力学中的混合物理理论来建立场方程,其基本假定是任一空间点上两相组分的质点共存,而争论的焦点集中在用此方法建立的平衡方程及其最后形式^[101]。多孔介质模型的建立必须解决将组分的体积分数作为独立的热力学变量而导致的模型封闭的问题。对于两相多孔介质而言,用混合物理理论建立多孔介质模型时,未知变量比已知关系刚好多一个,是非定解问题,即模型不封闭,其原因是在混合物理理论框架下建立的模型不能解答孔隙度在热力学过程中是如何演化的这一根本问题。故而如何解决模型封闭的问题成为建模时争论的第 2 个热点。

为使模型封闭,有人提出把两相组分简化为不可压,即两相组分的真实密度在热力学过程中保持不

变^[102]。如果多孔材料的结构可压缩性大到可以忽略真实组分的可压缩性,或者孔隙内的压力梯度和固体骨架内的有效应力梯度变化不明显,则可将由密度表达的质量平衡方程简化为由体积分数表达的质量平衡方程。由此所建立的模型相应地称为不可压模型,在描述某些多孔材料的瞬时动力问题和波的运动时给出了较为满意的结果^[103,104]。但是真实组分不可压这一近似处理会丢失第 2 种纵波,破坏了更一般的多孔介质中的双波结构。为克服上述困难,一种方法是建立一个与热力学相容的孔隙度的演化方程以使模型封闭;例如, Bowen^[105]提出了一个包含率型律(演化方程)的耦散不等式来控制组分的体积分数的演化。但是,考虑弹性多孔固体中充满气体这样一个实例,若把孔隙的变化解释为耦散效应,似乎缺乏足够的物理基础。另一种方法是建立体积分数的平衡方程,其核心在于对每一组分的可压缩性的正确描述以及要求与热力学相容。在综合第 2 种研究方法的成果的基础上, Wilmanski^[106]提出了两相多孔介质的拉格朗日模型,并依据连续介质力学和细观分析方法进行了深入研究。这个模型克服了上面提及的模型的种种缺陷,并且构造了一个新的关于孔隙度的平衡方程。此外,该模型选择固体骨架的拉格朗日描述而流体采用相对于固体骨架的拉格朗日描述,构造边值问题和用数值方法求解带来了方便。刘占芳等^[107]采用 Wilmanski 模型探讨了多孔材料中声波的传播和演化,结果表明声波的波幅在有限的传播时间内既可衰减为零,也可增长直至出现奇异,主要取决于波前初始形状的几何特性以及两相间的扩散效应。

通常情况下,由于多孔金属材料骨架的刚度比充斥其间的空气、水或其他流体要大数个量级,可以将其考虑为刚性体。在这种情况下研究声波的传播,一般采用基于简化的圆管内流动的 Kirchhoff 模型以及将热、黏效应分离的更为简化的模型。在上述模型中,多孔介质都是由平行直通管簇所构成。Allard 等^[108]对高孔隙率多孔材料发展了一个新的模型,在静流阻之外又引入了两个新参数:一个与孔洞的几何结构相关,而另一个则由热和黏性分别决定的特征长度的比值相关。此外, Wilson^[109]利用波传播中起控制作用的模态引进了两个特征时间,一个与热传导有关,一个与黏滞性有关;在此之上再加上与静流阻相关的特征量。在这些模型中, Wilson 模型的优点是物理上更明确,且在低频和高频段的结果更为合理。最近,卢天健等人对平行直纤维绕流的声传播问题进行了建模和理论分析^[110],模型中的直纤维规则排列,空气来流与纤维成一定角度绕过纤维阵列。该工作的意义在于为今后正确解决纤维类多孔材料中的声传播问题提供了完整的理论基础。此外,王晓林

等^[111]对平行直通孔开展了水下吸声优化的工作,并在此基础上推广到纤维泡沫的水下吸声优化:其空气吸声的理论结果和实验结果相近,但进一步的证实还需要进行更深入的研究。

多孔材料的吸声机制主要包括:材料本身的阻尼衰减、渗流在孔隙间的热弹性压缩膨胀、与孔壁摩擦的黏滞耗散以及流过边角所产生的涡等。在声波的传播和吸收过程中,哪些机制以及什么样的环境条件需要考虑决定于材料的应用环境。常温常压下空气在建筑用多孔材料中的声传播一般是线性的,不用考虑涡的影响。但当多孔材料应用于喷气发动机或是宇宙飞船这样的环境时,高声强成为不可避免的问题,从而需要对声传播和吸收进行非线性考虑。多孔板声衬在高声强并有平均流动的情况下的涡声相互作用机制是喷气发动机内穿孔板声衬消声的关键。如果多孔材料应用于水下环境并对其填充不同的液体介质,液体的黏滞性以及多孔材料骨架与液体在波传播中的相互作用将会变得重要。在孔隙的构型方面,粉末烧结制备的,或者纤维压实形成的,抑或熔体发泡制备的多孔金属在声波的传播和吸收中也会有不同程度的影响机制。如何正确地解决这些有关声波在多孔材料中传播的基本问题,需要开展进一步的深入研究。

4.3.2 电磁波

研究表明,多孔材料对电磁屏蔽存在显著影响,如多孔碳化硅的吸波性能是实心材料的两倍以上,这种吸收性质的改善主要来源于电磁波在多孔介质的反射和散射,而孔隙率和孔径是影响吸波性能的两个重要的参数^[112]。将金属丝制备成有序的空间结构(多孔金属丝结构),可以形成一种具有特殊性质的功能材料:左手材料。这种材料具有特殊的反常性质,如具有负折射率,电磁波在该材料中的传播的相速度方向和能量传播方向相反^[113]。该类型材料对电磁波的反射与折射性质与传统材料完全不同,有可能对基于电磁波的反射与折射原理建立起来的相关技术(如雷达隐身技术、成像技术等)带来根本性的改变^[16,114]。从多孔介质的吸波材料,到左手材料,其根本的思路是通过微结构进行设计,来达到对电磁波的传播进行调节,产生特殊的性质。因此研究对多孔和栅格材料的电磁波传播特性进行分析的数值方法及程序实现,其中包括相应的反问题的分析,将是对上述材料设计优化的关键和基础。这些研究也构成了多孔、栅格等轻质材料与电磁波相互作用的主要研究内容。近年来新型多孔材料和栅格材料的研制成功,为进一步优化夹芯复合材料吸收电磁波特性奠定了基础。

描述电磁波在多孔介质中的传播规律,需要将多孔介质进行均质化等效,进而建立相应等效均匀介质的等效介电常数和磁导率,并且这些等效物理量都与频率相关。传统的静态均质化方法虽然有了很大的进展,但研究这样一类动态的问题,发展相应的针对电磁波的动态均质化方法,目前还需要大量细致的基础性研究工作,例如:需要研究电磁波在多孔材料中的干涉、传输和吸收的规律和机理,建立多孔材料介质组分-孔型拓扑结构-电磁波吸收、干涉、屏蔽特性之间的有效关联,实现“宽频”或者“准频”等不同目的的“波屏蔽”或者“波吸收”多孔材料的有效设计、制备构筑理论平台,并提供制备构筑技术原型等。

要想实现上述目的并实现对新型多孔和栅格材料的优化,进而促进对吸波材料、隐身材料的设计和开发,首先必须要弄清上述材料对电磁波的相互作用规律。多孔和栅格材料微观结构的一个最大的特点是具有很高的孔隙率,通常大于90%。而针对复合材料发展起来的相关电磁波传播理论,如现有的有效场理论^[115],有效介质理论^[116]及CPA理论(coherent potential approximation)^[117]往往用到了单夹杂问题的结果,因此本质上是一种稀疏的估计,这一点与静态均质化方法类似^[118]。采用上述理论对于高孔隙率的多孔和栅格材料的动态有效磁导率和介电常数的预测,会带来很大的偏差。此外,波在非均质材料的传播的等效问题也存在许多基本问题没有很好解决。就电磁波而言,通过分析非均质代表单元某一平面波的传播,可以分别确定非均质材料的动态有效磁导率 μ_{eff} 和介电常数 ϵ_{eff} 与频率的关系,然而由等效均匀介质确定的等效波数 $k_{\text{eff}}^2 = \epsilon_{\text{eff}}\mu_{\text{eff}}\omega^2/c^2$ 一般并不满足由非均匀材料直接确定的色散关系^[117]。这样使得等效本身的物理意义不明确,也不自洽。

4.3.3 热辐射波

将多孔金属成功地应用于航空发动机燃烧室降噪,需要研究热量在高温环境下的复杂传递过程,其中热辐射尤显重要。本论文作者对铁合金及铜合金泡沫的空气对流换热及热辐射性能已进行了一些理论和试验研究^[119~121],测定了在真空状态下金属泡沫的当量导热系数随温度变化的规律,因而总体上确定了在高温下热辐射在金属泡沫热传递中的作用。为进一步研究热辐射在金属泡沫中的传递规律,对红外线波段在金属泡沫中的热辐射特性(衰减系数等)及其随波谱及泡沫微观结构参数的变化规律进行了系统测试,并建立了相应的热辐射模型。但由于热辐射波在多孔材料中传播的高度复杂性,仍有大量工作需要进一步进行。例如,根据不同需求,多孔金属的孔径大小

可从几个微米(甚至几十纳米)到几个毫米,孔径大小可相差达一千倍,因此热辐射波在金属泡沫中传播的尺度效应是一个需要研究的重要课题。

热辐射本质上是一种能量波的传递。表面温度达 5800K 高温的太阳所发射的辐射能主要集中在波长为 $0.407\ \mu\text{m}$ 的可见光区段和波长为 $0.72\ \mu\text{m}$ 的近红外区段。对于一般工业应用中的热辐射(如汽车、飞机等发动机燃烧室等),由于其温度范围大约位于 $700\ \text{K} \sim 2500\ \text{K}$,由普朗克能量分布定律知其辐射能主要集中在波长位于 $1\sim 25\ \mu\text{m}$ 的近红外区段。热辐射波在多孔金属中传播经历吸收、多重散射、反射及穿透等极其复杂的衰减过程,这种传播过程不仅与金属材料表面性质有关,而且与辐射温度(决定辐射能波长)和金属泡沫微观尺寸(孔径及泡沫支架粗细)等直接相关。当孔径及骨架直径接近(甚至小于)辐射波长时,其反射、散射及吸收等传播机理将不同于辐射波在大孔径泡沫中的传播过程。

4.4 多孔金属的传热特性

评价某种结构的传热性能,通常需要考虑两个变量:传热系数和流体压降。多孔金属中传热过程由两部分构成:金属骨架本身的热传导以及金属表面与流体间的对流换热。由于后者的传热热阻远远大于前者,增强金属表面与流体间的对流换热可以提高结构的整体传热性能。提高结构的比表面积,即增加单位体积内的对流换热面积,是有效的途径之一。

各种开孔多孔金属结构(包括无序的开孔金属泡沫,有序的多孔金属如点阵结构、金属丝网筛结构、蜂窝结构等)中,金属骨架材料的高热传导系数,孔穴内强制对流换热以及这些结构中的高比表面积使它们具有优良的换热性能。

4.4.1 开孔金属泡沫

金属泡沫特有的微观支架结构,高孔隙率($> 90\%$)及由此导致的高流速等特点,使金属泡沫中的对流换热不同于传统的多孔介质(如堆积颗粒)中的渗透流传热特性,因此,过去对传统多孔介质(孔隙率约 $30\%\sim 40\%$)研究得出的传热特性及流动规律并不适用于金属泡沫。从数学角度讲,由于金属泡沫的高孔隙率导致流动的非线性效果明显增强甚至起主导作用,用来描述传统的低孔隙率多孔介质的 Darcy 方程及其改进型都不适用于描述高孔隙率的金属泡沫。由于流动的非线性及泡沫金属中的微观传热都直接与其微观结构相关,因此有必要建立起基于金属泡沫微观组织结构用以描述其中流动和热量传递的动量方程及能量方程,对其中的流动规律和传热机理进行深入研究。

当前对金属泡沫的传热性能的研究主要在国外,且研究领域集中在常温导热和单相对流换热上。

Hunt 和 Tien^[122]对铝泡沫中以水为冷却工质的对流换热进行了研究,并对热扩散作用进行了分析。Lee 等人^[123]对铝泡沫金属应用于电子元器件空气冷却对流换热进行了测试,结果显示其具有很好的冷却效果(可达 $100\ \text{W}/\text{cm}^2$)。Kim 等^[124]对铝泡沫金属中的空气冷却效果与传统翅片式换热器进行了对比,结果发现铝泡沫金属的传热效果明显优于后者。Calmidi 和 Mahajan^[125,126]对铝合金泡沫的常温导热系数进行了测定,并对空气为冷却介质的单相对流换热进行了试验及数值研究。Boomsma 和 Poulidakos^[127]对铝合金泡沫的渗透率及泡沫的非均质性对传热的影响进行了理论及试验研究。Kumar 和 Reddy^[128]对金属泡沫在燃料电池中的应用进行了研究,结果显示金属泡沫的综合传热性能优于传统所用的微通道。

赵长颖、卢天健等^[17,18,125,129~132]对钢合金及铜合金泡沫的空气对流换热及热辐射性能进行了理论及试验研究,并在英国国家物理实验室首次对该材料的红外线波段的热辐射特性进行了测试。主要研究成果包括:对金属泡沫中这一高孔隙率的非 Darcy 流动的流体动力特性进行了理论及试验分析,确定了动量方程中非线性项在不同雷诺数下的作用,并基于金属泡沫微观结构提出了非线性惯性力项的表达式。对 12 种钢合金及铜合金金属泡沫中的空气冷却对流换热特性进行了试验及理论研究,测定了对流传热随雷诺数及金属泡沫微观结构(孔隙率、孔隙大小等)参数的变化规律,并建立了基于金属泡沫微观结构的单相对流传热模型。首次测定了在真空状态下金属泡沫的当量导热系数随温度(由低温到高温)的变化规律,总体上确定了高温下热辐射在金属泡沫热传递中的作用。为进一步研究热辐射在金属泡沫中的传递规律,首次对红外线波段的金属泡沫中热辐射特性(衰减系数等)随波谱及泡沫微观结构参数的变化规律进行了系统测试,并建立起了相应的热辐射模型。最近赵长颖等^[133,134]对金属泡沫套管式换热器进行了理论分析,得出了影响换热性能的无量纲参数,结果表明金属泡沫换热器换热性能明显优于传统翅片换热器。

4.4.2 有序多孔金属

点阵结构及金属丝网筛结构中的流动具有共同特点:即圆柱管束的绕流运动。在圆柱根部与夹心板接触点以及圆柱绕流区均有涡旋产生,因此,在这两种结构中以湍流流动换热为主。

点阵结构是近年来出现的新型结构,对其流动传热规律的研究非常有限,并且主要集中于单相强制对流换热。Hoffman^[135]对层芯为双层点阵结构(kagome)的夹层结构中总的流体压降及传热性能进

行了实验研究, 结果发现其流动与传热特性均为各向异性. Kim 等^[9,33,136,137]对层芯为单层点阵结构(LFM)的夹层结构中的强制对流换热进行了实验、理论和数值研究, 揭示了该结构中流体压降及传热的局部及整体分布特征, 同时发现与两平板间的传热性能相比, 引入点阵结构层芯使整体传热性能提高 6 倍.

对金属丝网筛结构的流动换热研究开始较早. Kays 和 London^[138]给出了一组不同空隙率的金属丝网筛堆砌而成的换热器的流动和传热曲线. 文献^[139~141]分别对该结构中的流体压降进行了理论研究, Armour 等^[142]对此进行了实验研究, 这些研究表明金属丝网筛堆砌结构中流动压降与其几何结构相关, 其中空隙率是最主要的参数. 田靖等^[143,144]对以金属丝网筛堆砌结构为层芯的夹层结构总的流体压降及传热性能进行了实验研究, 讨论了流动方向、网筛形状以及空隙率等各种因素的影响, 研究表明金属丝网筛堆砌结构中的流动与传热特性均为各向异性, 其整体传热性能与翅片管传热性能相当.

不同于上述两种有序多孔金属结构中的湍流流动换热, 在蜂窝结构中, 层流为主要流动形式, 流动压降较小. 同时, 蜂窝结构中的高比表面积弥补了层流对流换热的低传热系数. 因此, 蜂窝结构在压降和传热系数两方面均有良好表现. 近年来, 研究人员开始对蜂窝结构中的对流换热开始研究. 研究工作主要集中在两个研究小组: 英国剑桥大学的卢天健研究小组^[8,14,145]和美国乔治亚理工大学的 McDowell 研究小组^[146~149]. 前者主要致力于建立和发展理论模型 (corrugated wall model) 来预测不同单元形状的金属蜂窝结构的传热性能. 后者则从材料结构设计角度, 利用不同的数值计算方法 (有限差分 and 有限元), 通过优化纵向单元尺寸从而达到优化结构以获取最优传热性能. 同时, McDowell 小组还进行了部分实验研究^[148,149]. 所有这些研究表明, 蜂窝结构的传热性能与其拓扑结构有很大关系, 通过优化拓扑结构, 蜂窝结构的传热性能可以达到最优.

4.4.3 多相传热

上述对多孔金属的研究, 无论无序或有序, 均是针对单相对流传热特性, 对其中的两相 (包括沸腾和凝结) 传热, 到目前为止在公开发表的文献中未见这方面的研究成果. 两相传热在制冷及空调领域扮演极为重要的角色, 而多孔金属的微细多孔结构及表面积为强化凝结和沸腾提供了非常诱人的前景, 另外, 由于两相传热系数非常高, 在不需很高流速下流体侧热阻便可很小, 因此流动压降可以大大降低. 所以将多孔金属应用于两相换热具有更大的潜力, 对多孔金属中的两相流动及传热进行理论及试验方面的研究, 具

有重要的意义.

近年来, 微小通道中的沸腾换热机理引起了传热界的极大兴趣. 基于优良的传热特性, 微小尺度通道正在开始应用到冷凝器及蒸发器中, 但由于其截面微小, 需要多管束连接而成, 因而其制造成本较高. 而多孔金属总表面积非常大, 因而具有更多的固体沸腾区. 以泡沫金属为例, 从微观结构上它可看成是类似于无数相互连接的微小通道, 所以可以预见金属泡沫通道总体沸腾传热效果将会大大加强, 而且其制造成本较低. 我们知道在光通道中的沸腾传热机理大致可分为核态沸腾及对流沸腾两种. 在核态沸腾为主的区域, 靠近加热管壁液体被过热到一定程度会持续产生沸腾核及汽泡不断长大从而带走热量. 核态沸腾传热效果主要取决于热流密度, 而质量流量和干度起次要作用. 而对流沸腾传热热量主要通过导热方式穿过液膜而带走热量. 对流沸腾传热效果主要取决于质量流量和干度, 而与热流密度关系不大. 光通道中核态沸腾流型主要表现为泡状流和柱状流, 对流沸腾传热主要呈现为环状流. 而在金属泡沫通道中, 稠密的骨架结构可以限制汽泡的长大 (大的汽泡在流动中会被泡沫支架打碎), 使流动趋于均质化, 从而其流型分布也必然与光通道中不同. 而且金属泡沫通道中热流可不仅由管壁直接传给流体, 固体泡沫支架还可迅速地将壁面热流通过导热传到整个管道截面, 从而极大地增强传热效果并降低烧干现象的发生. 另外金属泡沫微观结构参数 (如孔隙率及孔洞大小等) 变化及其尺度效应对沸腾传热的影响也是一个有待研究的重要问题, 由于金属泡沫孔洞尺寸变化可从几毫米到几十微米, 这将涉及多孔微细多尺度下的流变及微核化沸腾热量传递这一热物理界具有挑战性的课题.

在理论模型方面, 对于两相对流传热, 由于对其传热机理不甚清楚且缺乏试验数据, 至今未有可靠理论模型出现. 多孔金属中的两相传热模型将更复杂, 因为涉及到金属构架中的导热及沸腾、凝结的相互影响及耦合问题.

由上简述可见, 多孔金属中两相传热无论是理论研究 (包括数值模拟) 以及实验研究都有大量工作要做. 金属泡沫两相传热问题的研究基本上是一个空白, 急需开展有关研究.

5 结语

追求高性能材料的轻质化不仅是过去几十年材料科学研究的重要目标, 也是今后可预见的几十年里不变的主题之一. 随着高新技术的迅猛发展, 人们已不再满足于单纯的轻质化, 而是寻找兼有轻质和其它某种或某几种优良性能相结合的先进材料以适应不同的需求.

超轻多孔金属是近年来随着多样化需求材料制备以及机械加工技术的迅速发展而出现的一类新颖多功能材料, 它的出现对于材料的选择及其性能研究提出了新的课题。本文介绍了有关多孔金属材料的制备、性能表征等方面的国内外研究现状和发展趋势, 着重于探讨多孔金属的多功能复合特性及其在国民经济和国防领域中的应用。可以预见, 超轻多孔金属今后数十年间在高能耗装备(汽车、高速列车、航空航天器、轮船等)的广泛应用, 不仅会大幅降低对常规能源的依赖, 同时也可减少对环境造成的污染。同时, 这类材料的高孔隙率及大量内部空间使其具有独特的多功能复合特性, 在能源、微电子、建筑、国防等国家支柱产业中尤显意义重大。

致谢 感谢西安交通大学欧卓成、赵桂平、李涤尘、陈花玲、杨志懋, 西北有色金属研究院汤慧萍, 东南大学何思渊, 北京理工大学胡更开, 清华大学邱信明, 上海交通大学范同祥等的帮助。

参 考 文 献

- Banhart J. Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foams. *Progress Mater Sci*, 2001, 46: 559~632
- Ashby M A, Evans A G, Fleck N A, Gibson L J, et al. *Metal Foams: A Design Guide*. Oxford: Butterworth Heinemann, 2000
- Gibson L J, Ashby M F. *Cellular Solids: Structure and Properties*, 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1997
- Sugimura Y, Meyer J, He M Y, Bart-Smith H, et al. On the mechanical performance of closed cell Al alloy foams. *Acta Mater*, 1997, 45: 5245~5259
- McCullough K Y G, Fleck N A, Ashby M F. Toughness of aluminium alloy foams. *Acta Mater*, 1999, 47: 2331~2343
- Chen C, Fleck N A, Lu T J. The mode I crack growth of metallic foams. *J Mech Phys Solids*, 2001, 49: 231~259
- Evans A G, Hutchinson J W, Fleck N A, Ashby M F, Wadley H N G. The topological design of multifunctional cellular metals. *Prog Mater Sci*, 2001, 46: 309~327
- Gu S, Lu T J, Evans A G. On the design of two-dimensional cellular metals for combined heat dissipation and structural load capacity. *Int J Heat Mass Trans*, 2001, 44: 2163~2175
- Kim T, Zhao C Y, Lu T J, Hodson H. Convective heat dissipation with lattice-frame materials. *Mech Mater*, 2004, 36: 767~780
- Lu T J, Hess A, Ashby M F. Sound absorption in metallic foams. *J Appl Phys*, 1999, 85: 7528~7539
- Wang X L, Lu T J. Optimized acoustic properties of cellular solids. *J Acous Soc Am*, 1999, 106: 756~765
- Ashby M F, Lu T J. Metal foams: a survey. *Science in China (B)* 2003, 46(6): 521~532
- Matsumoto I, Iwaki T, Yanagihara N. Battery electrode. US Patent 4,251,603, 1981
- Lu T J, Valdevit L, Evans A G. Active cooling by metallic sandwich structures with periodic cores. *Prog Mater Sci*, 2005, 50: 789~815
- Dupere I D J, Dowling A P, Lu T J. Viscous drag experienced by acoustic waves propagating through cylindrical mesh structures. *Proc Roy Soc Lond*, 2006, in press
- 胡更开. 左手材料及在隐身技术中应用探讨. 2004年7月, 国防报告
- Zhao C Y, Kim T, Lu T J, Hodson H P. Thermal transport in high porosity cellular metal foams. *J Thermophysics and Heat Transfer*, 2004, 18: 309~317
- Zhao C Y, Lu T J, Hodson H P. Thermal radiation in metal foams with open cells. *Int J Heat and Mass Transfer*, 2004, 47: 2927~2939
- Sosnik A. Process for making foamlike mass of metal. US Patent, 2434775, 1948
- Elliott J C. Method of producing metal foam. US Patent, 2751289, 1956
- 上野英俊, 秋山茂. 熔融アルミニウムの发泡性に基づきカルシウム添加効果. 轻金属(日), 1987, 37(1): 42~47
- 伊藤雅夫, 西河彻, 森本一男, など. 发泡アルミニウム“アルポラス”の開発. 日本金属学会会报, 1987, 26(4): 311~313
- Wu Z J, He D P. Changes in porosity of foamed Al during solidification. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45: 1667~1672
- 宋振纶, 何德坪. 铝熔体泡沫化过程中粘度对孔结构的影响. 材料研究学报, 1997, 11(3): 274~279
- 吴照金, 何德坪. 泡沫铝的压缩及能量吸收性能研究. 应用科学学报, 2001, 19(4): 357~361
- Zheng M J, He D P, Dai G. The additional force in the cooling process of cellular Al alloy. *Science in China (B)*, 2002, 45(6): 512~520
- 郑明军, 何德坪. 新型高比强泡沫铝合金的压缩及能量吸收性能. 材料研究学报, 2002, 16(5): 27~32
- 戴戈, 何德坪, 尚金堂. 铝合金熔体粘度的实时精确检测及控制. 材料研究学报, 2005, 19(1): 37~43
- Yang D H, He D P, Yang S R. Thermal decomposition kinetics of TiHB2B and Al alloy melt foaming process. *Science in China (B)*, 2004, 47(6): 512~520
- Yang D H, He D P. Porosity of porous Al alloy. *Science in China (B)*, 2001, 44(4): 411~418
- 何德坪, 闻德荪, 张勇. 铝熔体在多孔介质中的渗流过程. 材料研究学报, 1997, 11(2): 113~119
- Liu J S, Lu T J. Multi-objective and multi-loading optimization of ultralightweight truss materials. *Int J Solids Struct*, 2004, 41: 619~635
- Kim T, Hodson H P, Lu T J. Fluid flow and endwall heat-transfer characteristics of lattice-frame materials. *Int J Heat and Mass Transfer*, 2004, 47: 1129~1140
- Lu T J, Hutchinson J W, Evans A G. Optimal design of a flexural actuator. *J Mech Phys Solids (The Hutchinson-Rice 60PthP Birthday Memorial Issue)*, 2001, 49: 2071~2093
- Zhou D W, Stronge W J. Mechanical properties of fibrous core sandwich panels. *Int J Mech Sci*, 2005, 47 (4-5): 775~798
- 柳百成. 21世纪的材料成形加工技术. 航空制造技术, 2003, 6: 17~21
- 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
- Warren W E, Kraynik A M. Linear elastic behavior of a low-density Kelvin foam with open cells. *ASME J Appl Mech*, 1997, 64: 787~794
- 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
- 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

- 41 Grenestedt J L. Influence of wavy imperfections in cell walls on elastic stiffness of cellular solids. *J Mech Phys Solids*, 1998, 46: 29~50
- 42 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
- 43 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
- 44 Hutchinson R G, Wicks N, Evans A G, et al. Kagome plate structures for actuation. *Int J Solids Struct*, 2003, 40: 6969~6980
- 45 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
- 46 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
- 47 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
- 48 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
- 49 Roberts A P, Garboczi E J. Elastic moduli of model random three-dimensional closed-cell cellular solids. *Acta Mater*, 2001, 49: 189~197
- 50 Roberts A P, Garboczi E J. Elastic properties of model random three-dimensional open-cell solids. *J Mech Phys Solids*, 2002, 50: 33~55
- 51 Papka S D, Kyriakides S. In-plane crushing of a polycarbonate honeycomb. *Int J Solids Struct*, 1998, 35: 239~267
- 52 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
- 53 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
- 54 Chen C, Fleck N A. Size effects in the constrained deformation of metallic foams. *J Mech Phys Solids*, 2002, 50: 955~977
- 55 Chen J Y, Huang Y, Ortiz M. Fracture analysis of cellular materials: a strain gradient model. *J Mech Phys Solids*, 1998, 46: 789~828
- 56 Wang X L, Stronge W J. Micropolar theory for two-dimensional stresses in elastic honeycomb. *Proc R Soc Lond*, 1999, A455: 2091~2116
- 57 Kumar R S, McDowell D L. Generalized continuum modeling of 2-D periodic cellular solids. *Int J Solids Struct*, 2004, 41: 7399~7422
- 58 Sigmund O, Torquato S. Design of materials with extreme thermal expansion using three-phase topology optimization method. *Int J Solids Struct*, 1997, 45: 1037~1067
- 59 Deshpande, V S, Fleck N A. Isotropic constitutive models for metallic foams. *J Mech Phys Solids*, 2000, 48: 1253~1283
- 60 Gibson L J, Ashby M F, Zhang J, Triantafillou TC. Failure surface for cellular materials under Multiaxial loads: I. Modeling. *Int J Mech Sci*, 1989, 31: 635~663
- 61 Miller R E. A continuum plasticity model for the constitutive and indentation behaviour of foamed metals. *Int J Mech Sci*, 2000, 42: 729~754
- 62 Chen C, Lu T J. A phenomenological framework of constitutive modelling for incompressible and compressible elastoplastic solids. *Int J Solids Struct*, 2000, 37: 7769~7786
- 63 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
- 64 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: 673~679
- 65 Deshpande V S, Fleck N A. High strain rate compressive behavior of aluminium alloy foams. *Int J Impact Eng*, 1999, 24: 277~298
- 66 Dannemann K A, Lankford Jr J. High strain rate compression of closed-cell aluminium foams. *Mater Sci Eng*, 2000, A239: 157~164
- 67 Zhao H. Cellular Materials upon Impact Loading. Warsaw: Institute of Fundamental Technological Research, 2004
- 68 Deshpande V S, Fleck N A. Energy absorption of an egg-box material. *J Mech Phys Solids*, 2003, 51(1): 187~208
- 69 Tan P J, Harrigan J J, Reid S R. Inertia effects in the uniaxial dynamic compression of a closed-cell aluminium alloy foam. *J Mater Sci Tech*, 2002, 18: 480~488
- 70 孙悦, 刘福生, 高占鹏等. 多孔铝烧结体的静压 p-V 特性研究. *高压物理学报*, 2002, 16(2): 119~124
- 71 孙悦, 王小琴, 张清福. 泡沫铝材料的吸能特性研究. *四川大学学报*, 2002, 34 (1): 124~126
- 72 Lopatnikov S L, Gama B A, Haque M J, Krauthausen C, et al. High-velocity plate impact of metal foams. *Int J Impact Engng*, 2004, 30: 421~445
- 73 Strong W J, Shim V P W. Dynamic crushing of a ductile cellular array. *Int J Mech Sci*, 1987, 29: 381~406
- 74 虞吉林. 泡沫金属材料结构的冲击力学行为. 见: 洪友编. 应用力学进展, 北京: 科学出版社, 2004
- 75 Deshpande V S, Fleck N A. High strain rate compressive behavior of aluminium alloy foams. *Int J Impact Eng*, 1999, 24: 277~298
- 76 Dannemann K A, Lankford J J. High strain rate compression of closed-cell aluminium foams. *Mater Sci Eng*, 2000, A239: 157~164
- 77 胡时胜, 王悟, 潘艺等. 泡沫材料的应变率效应. *爆炸与冲击*, 2003, 23(1): 13~18
- 78 Hanssen A G, Enstock L, Langseth M. Close-range blast loading of aluminum foam panels. *Int J Impact Eng*, 2000, 27: 593~618
- 79 Guruprasad S, Mukherjee A. Layered sacrificial claddings under blast loading. *Int J Impact Eng*, 2000, 24: 957~984
- 80 Qiu X, Deshpande V S, Fleck N A. Finite element analysis of the dynamic response of clamped sandwich beams subject to shock loading. *Euro J Mech A/Solids*, 2003, 22: 801~814
- 81 Xue Z Y, Hutchinson J W. A comparative study of impulse-resistant metal sandwich plates. *Int J Impact Eng*, 2004, 30: 1283~1305
- 82 王海福, 冯顺山. 多孔铁中冲击波压力特性的研究. *北京理工大学学报*, 1998, 18(2): 165~169
- 83 Xue Z, Hutchinson J W. Preliminary assessments of sandwich plates subject to blast loads. *Int J Mech Sci*, 2003, 45: 687~705
- 84 Fleck N A, Deshpande V S. The resistance of clamped sandwich beams to shock loading. *ASME J Appl Mech*, 2004, 71(3): 386~401
- 85 Qiu X, Deshpande V S, Fleck N A. Dynamic response of a clamped circular sandwich plate subject to shock loading. *ASME J Appl Mech*, 2004, 71 (5): 637~645
- 86 Lam K Y, Chun L. Dynamic response of a simply supported sandwich beam subjected to impulsive loading. *Composite Structures*, 1994, 27 (3): 331~337
- 87 Yu T X, Yang J L, Reid S R. Interaction between reflected elastic flexural waves and a plastic 'hinge' in the dynamic

- response of pulse loaded beams. *Int J Impact Eng*, 1997, 19 (5~6): 457~475
- 88 Suvorov A P, Dvorak G J. Enhancement of low velocity impact damage resistance of sandwich plates. *Int J Solids Struct*, 2005, 42 (8): 2323~2344
- 89 Fleck N A, Muller G M, Ashby M F, Hutchinson J W. Strain gradient plasticity: theory and experiments. *Acta Metall Mater*, 1994, 42: 475~487
- 90 Fleck N A, Hutchinson J W. A phenomenological theory for strain gradient effects in plasticity. *J Mech Phys Solids*, 1993, 41: 1825~1857
- 91 Fleck N A, Hutchinson J W. Strain gradient plasticity. In: Hutchinson. J W, Wu T Y, eds. *Advances in Applied Mechanics*. New York: Academic Press, 1997. 33: 295~361
- 92 Li D, Benaroya H. Dynamics of periodic and near-periodic structures. *Appl Mech Rev*, 1992, 45: 447~459
- 93 Abrate S. Impact on laminated composite materials. *Appl Mech Rev*, 1991, 44: 155~190
- 94 Abrate S. Impact on laminated composite: Recent advances. *Appl Mech Rev*, 1994, 47:517~544
- 95 Pierre C, Castanier M P, Chen W J. Wave Localization in multi-coupled periodic structures: Application to truss beams. *Appl Mech Rev*, 1996, 49: 65~86
- 96 Mead D J. Wave propagation and natural modes in periodic system: I. Mono-coupled system. *J Sound Vib*, 1975, 40: 1~18
- 97 Mead D J. Wave propagation and natural modes in periodic system: II Multi-coupled system, with or without damping. *J Sound Vib*, 1975, 40: 19~39
- 98 Zhong W X, Williams F M. Wave problems for repetitive structures and symplectic mathematics. *J Mech Eng Sci, Proc Mech Eng Instn*, 1992, 206C: 371~379
- 99 Biot A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid-I. low-frequency range. *J Acoust Soc Am*, 1956, 28: 168~178
- 100 Plona T J. Acoustics of fluid-saturated porous media. In: McAvoy B R, ed. *Ultrasonics Symposium Proceedings*. New York: IEEE, 1982. 1044~1048
- 101 Bedford A, Drumheller DS. Recent advances: Theories of immiscible and structured mixtures. *Int J Eng Sci*, 1983, 21: 863~960
- 102 Bowen R M. Incompressible porous media models by use of the theory of mixtures. *Int J Eng Sci*, 1980, 18: 1129~1148
- 103 Prevost J H. Nonlinear transient phenomena in saturated porous media. *Comp Meth Appl Mech Eng*, 1982, 20: 3~18
- 104 De B R, Liu Z. Growth and decay of acceleration waves in incompressible saturated poroelastic solids. *ZAMM*, 1995, 76: 341~347
- 105 Bowen R M. Compressible porous media models by use of the theory of mixtures. *Int J Eng Sci*, 1982, 20: 697~735
- 106 Wilmanski K. Lagrangian model of two phase porous material. *J Non-equilib Therm Dyn*, 1995, 20: 50~77
- 107 刘占芳, 严波. 多孔材料中声波的传播与演化. *应用力学学报*, 1999, 16(1): 39~46
- 108 Allard J F, Champoux Y. New empirical equations for sound propagation in rigid frame fibrous materials. *J Acoust Soc Am*, 1992, 91: 3346~3353
- 109 Wilson D K. Relaxation-matched modeling of propagation through porous media, including fractal pore structure. *J Acoust Soc Am*, 1993, 94: 1136~1145
- 110 Dupere I D J, Dowling A P, Lu T J. The absorption of sound in cellular foams. ASME International Mechanical Engineering Congress, IMECE2004-60618, 2004
- 111 王晓林, 刘克. 金属纤维泡沫吸声板的优化模型. 见: 全国环境声学电磁辐射环境学术会议, 三亚, 2004. 12. 4~7
- 112 朱新文, 江东亮, 谭寿涛. 碳化硅网眼多孔陶瓷的微波吸收特性. *有机材料学报*. 2002, 17: 1152~1156
- 113 Shelby R A, Smith D R, Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction. *Science*, 2001, 292: 77~79
- 114 邢丽英. 隐身材料. 北京: 化学工业出版社, 2004
- 115 Kanaun S K. Self-consistent schemes in the problem of electromagnetic wave propagation through dielectric media with isolated inhomogeneities. *Wave Motion*, 1998, 27: 355~378
- 116 Bergman D J. Variational bounds on some bulk properties of a two-phase composite material. *Phys Rev*, 1976, B14: 1531~1542
- 117 Choy T C. *Effective Medium Theory-Principles and Applications*. Oxford: Oxford University Press, 1999
- 118 Ma H L, Hu G K, Huang Z P. A micromechanical method for particulate composites with finite particle concentration. *Mech Mater*, 2004, 36: 359~368
- 119 Zhao C Y, Lu T J, Hodson H P, Jackson J D. The temperature dependence of effective thermal conductivity of open-celled steel alloy foams. *Mater Sci Eng*, 2004, A367: 123~131
- 120 Zhao C Y, Lu T J, Hodson H P. Thermal radiation in ultralight metal foams with open cells. *Int J Heat Mass Transfer*, 2004, 47: 2927~2939
- 121 Zhao C Y, Lu T J, Hodson H P. Measurements of thermal radiation in ultralight metal foams with open cells. *J Mechanical Engineering Science, IMechE Proceeding*, 2004, 218: 1297~1307
- 122 Hunt M L, Tien C L. Effects of thermal dispersion on forced convection in fibrous media. *Int J Heat Mass Transfer*, 1988, 31: 301~309
- 123 Lee Y C, Zhang W, Xie H, Mahajan R L. Cooling of a FCHIP package with 100 W 1 cm² chip. In: *Proceedings of ASME International Electronic Packaging Conference*, Vol. 1. New York: ASME. 1993. 419~423
- 124 Kim S Y, Paek J W, Kang B H. Flow and heat transfer correlations for porous fin in a plate-fin heat exchanger. *J of Heat Transfer*, 2000, 122: 572~578
- 125 Calmidi V V, Mahajan R L. Forced convection in high porosity metal foams. *J of Heat Transfer*, 2000, 122: 557~565
- 126 Calmidi V V, Mahajan R L. The effective thermal conductivity of high porosity fibrous metal foams. *ASME J of Heat Transfer*, 1999, 121: 466~471
- 127 Boomsma K, Poulikakos D. The effects of compression and pore size variations on the liquid flow characteristics in metal foams. *ASME J Fluids Eng*, 2001, 124: 263~272
- 128 Kumar A, Reddy R G. Materials and design development for bipolar/end plates in fuel cells. *J Power Sources*, 2004, 129: 62~67
- 129 Lu T J, Stone H A, Ashby M F. Heat transfer in open-cell metal foams. *Acta Mater*, 1998, 46: 3619~3635
- 130 Zhao C Y, Lu T J, Hodson H P. Natural convection in metal foams with open cells. *Int J Heat and Mass Transfer*, 2005, 48: 2452~2463
- 131 Zhao C Y, Lu T J. Analysis of microchannel heat sinks for electronics cooling. *Int J Heat and Mass Transfer*, 2002, 45: 4857~4869
- 132 Zhao C Y. Thermal transport in cellular metal foams with open cells: [PhD thesis]. University of Cambridge 2004
- 133 Lu W, Zhao C Y, Tassou S A. Thermal analysis on metal-foam filled heat exchangers, I. Metal-foam filled pipes. *Int J Heat and Mass Transfer*, 2006, 49: 2751~2761

- 134 Zhao C Y, Lu W, Tassou, S A. Thermal analysis on metal-foam filled heat exchangers, II. Tube heat exchangers. *Int J Heat and Mass Transfer*, 2006, 49: 2762~2770
- 135 Hoffman F. Heat transfer performance and pressure drop of kagome core metal truss panels: [MPhil thesis]. University of Cambridge, 2002
- 136 Kim T, Hodson H P, Lu T J. Contribution of vortex structures and flow separation to local and overall pressure and heat transfer characteristics in an ultralight weight lattice material. *Int J Heat Mass Transfer*, 2005, 48: 4243~4264
- 137 Kim T. Fluid-flow and Heat-transfer in a lattice-frame material: [PhD thesis]. University of Cambridge 2003
- 138 Kays W M, London A L. Compact Heat Exchangers. New York: McGraw-Hill, 1964
- 139 Ergun S. Fluid flow through packed columns. *Chemical Engineering Progress*, 1952, 48: 89~94
- 140 Mehta D, Hawley M A. Wall effect in packed columns. *I & EC Process Design and Development*, 1969, 8: 280~282
- 141 Sodre J R, Parise J A R. Friction factor determination for flow through finite wire-mesh woven-screen matrices. *J Fluid Eng ASME*, 1997, 119: 847~851
- 142 Armour J C, Cannon J N. Fluid flow through woven screens. *AIChE J*, 1968, 14: 415~421
- 143 Tian J, Kim T, Lu T J, Hodson H P, et al. The effects of topology upon fluid-flow and heat-transfer within cellular copper structures. *Int J Heat and Mass Transfer*, 2004, 47: 3171~3186
- 144 Tian J. Fluid flow and heat transfer in woven textiles: [PhD thesis]. University of Cambridge, UK 2005
- 145 Lu T J. Heat transfer efficiency of metal honeycombs. *Int J Heat and Mass Transfer*, 1999, 42: 2031~2040
- 146 Kumar R S, McDowell D L. Rapid preliminary design of rectangular linear cellular alloys for maximum heat transfer. *AIAA J*, 2004, 42: 1652~1661
- 147 Seepersad C C, Dempsey B M, Allen J K, et al. Design of multifunctional honeycomb materials. *AIAA J*, 2004, 42: 1025~1033
- 148 Hayes A M, Wang A, Dempsey B M, McDowell D L. Mechanics of linear cellular alloys. *Mech Mater*, 2004, 36: 691~713
- 149 Dempsey B M, Eisele S, McDowell D L. Heat sink applications of extruded metal honeycombs. *Int J Heat and Mass Transfer*, 2005, 48: 527~535

THE MULTI-FUNCTIONALITY OF ULTRA-LIGHT POROUS METALS AND THEIR APPLICATIONS *

LU Tianjian^{1,2,†} HE Deping³ CHEN Changqing¹ ZHAO Changying⁴
FANG Daining⁵ WANG Xiaoling⁶

¹MOE Key Laboratory of Strength & Vibration, School of Aerospace, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

²Department of Engineering, University of Cambridge, Cambridge, CB2 1PZ, UK

³Department of Materials Science, Southeast University, Nanjing 210018, China

⁴School of Energy and Power, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

⁵School of Aerospace, Tsinghua University, Beijing 100080, China

⁶Acoustic Research Institute, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China

Abstract Ultra-light porous metals are novel multi-functional materials, following the rapid development of new manufacturing technologies and materials processing. In this paper, a state-of-the-art review of the research and development on porous cellular metals is presented, including stochastic metallic foams and periodic lattice metals. New research directions about these materials are also discussed, with emphasis placed on their multifunctionality and commercial applications.

Keywords porous metals, materials processing, mechanical behavior, wave propagation, acoustics, heat transfer

* The project supported by the National Basic Research Program of China (2006CB601201, 2006CB601202, 2006CB601203, 2006CB601204), the "111" Project (B06024) and the National Natural Science Foundation of China (10328203, 10302024, 10425210, 10572111, 10632060, 50576069, 50471031, 90205005)

† E-mail: TJLu@mail.xjtu.edu.cn