

# 轻质多孔材料研究进展

杨亚政<sup>1,2</sup>, 杨嘉陵<sup>1</sup>, 曾涛<sup>3</sup>, 方岱宁<sup>4</sup>

1. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100083; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100080; 3. 哈尔滨理工大学, 哈尔滨 150080; 4. 清华大学 航天航空学院, 北京 100084

**摘要:** 高超声速武器是军事装备的发展方向, 在未来战争中起着重要作用。轻质材料是高超声速飞行器设计与制造的关键技术之一, 它是实现高超声速飞行器高超声速、高机动性、远程打击等性能的基础和保障。高超声速飞行器轻质材料主要有蜂窝材料、泡沫金属材料、点阵材料。这些材料具有超轻、高比强、高比刚度、高强韧、高能量吸收等优良机械性能, 以及减震、散热、吸声、电磁屏蔽等特殊性质, 它兼具功能和结构双重作用, 是一种性能优异的多功能材料。本文从材料制备、结构设计、力学与物理性能表征等方面综述了高超声速飞行器轻质材料的研究与应用现状, 比较了三种轻质材料的机械和物理性能, 重点评述了新型点阵材料的制备工艺、结构构型、力学及其他性能, 指出了其发展趋势。

**关键词:** 高超声速飞行器; 轻质材料; 制备工艺; 力学性能; 多功能

**中图分类号:** TB383      **文献标识码:**      **文章编号:** 0254-0053(2007)04-503-14

## Progress in Research Work of Light Materials

YANG Ya-zheng<sup>1,2</sup>, YANG Jia-ling<sup>1</sup>, ZHENG Tao<sup>3</sup>, FANG Dai-ning<sup>4</sup>

(1. School of Aeronautic Science and Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China; 2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China; 3. Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China; 4. School of Aeronautics and Astronautics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Hypersonic vehicles represents future trends of military equipments and play an important role in future war. Light materials and structures are one of the most key techniques in design and manufacture of hypersonic vehicles. They are foundation and safeguard of hypersonic velocity, high flexibility and long distancedestroying properties for hypersonic vehicles. Hypersonic vehicle light materials, which include honeycomb sandwich structures, foamed metals and truss structures, possess light weight, high specific strength, high specific stiffness, high toughness and good energy absorption properties. They also possess energy dissipation, heat dissipation, sound absorption and electromagnetic shielding properties. They can be used not only as structural materials, but also as function materials. In short, hypersonic vehicle light materials are excellent multi - function materials. The recent progresses of research and application of light hypersonic vehicle materials in preparation, structure design, mechanical and physical characterization are summarized in this paper. A comparison of mechanical and physical properties of three kinds of light materials are made. Fabricated process configuration, mechanical and functional properties are emphasized and the tendency of light materials is pointed out.

**Key words:** hypersonic vehicle; light materials; materials processing; mechanical behaviors; multifunction

收稿日期: 2007-09-11

基金项目: 国家自然科学基金(10632060, # 90305015); 国家“973”基金(G2006CB601202)

作者简介: 杨亚政(1968-), 男, 黑龙江北安市人, 副编审. 研究方向: 固体力学.

通讯作者: 方岱宁, 教授, 研究方向: 电磁固体力学、细观力学、材料的强韧化和微电子器件可靠性. fangdn@tsinghua.edu.cn

高超声速(Hypersonic)一般指的是流动或飞行的速度超过 5 倍声速,即马赫数超过 5。超高声速飞行器包括弹道导弹、拦截导弹、高超声速巡航导弹、再入飞行器、跨大气层飞行器以及高超声速飞机等。以高机动性、远距离精确打击为主要技术特征的高超声速武器已成为军事装备的发展方向,将在未来战争中起着重要作用。与传统武器相比,高超声速武器具有极大的优势,可以有效地减少防御响应时间,增强武器突防和反防御能力,提高武器生存能力。高超声速飞行器要实现高超声速、高机动、远程打击,必须尽可能降低飞行器的重量。对于高超声速飞行器结构设计,减轻结构质量、提高结构的承载效率和功能效率是非常重要的设计要求。提高结构的承载效率就是要提高结构材料的比刚度和比强度,同时要使得材料能满足结构设计的特定力学要求。提高结构的功能效率,就是要提高结构的功能密度,用更少的质量实现更多的功能。轻质多功能材料是近年来随着材料制备以及机械加工技术的迅速发展而出现的一类新材料,它的出现对于材料的选择及其性能研究提出了新的课题。轻质多功能材料包括蜂窝材料、泡沫金属材料、点阵材料。通常,轻质多功能材料单位体积的重量仅是同等材质实体材料的十分之一或更轻,而且不同构型的微细观结构对材料的力学及其他物理特性有显著影响。除了承载,轻质多功能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,以及降低噪音、屏蔽电磁辐射、吸收碰撞能量等。因此,关于高超声速飞行器轻质多功能材料的研究十分重要。

## 1 蜂窝材料

蜂窝夹层结构材料是一种轻质、高强、各向异性材料。蜂窝夹层结构材料具有优良的抗冲击能力、耐热防腐、导电、导热、隔热、隔音、吸能减震、电磁屏蔽等功能,广泛应用于航天航空、交通运输、电子、环保、能源、建筑等领域。

### 1.1 制备工艺

蜂窝夹层结构分为金属蜂窝夹层结构和非金属蜂窝夹层结构。金属蜂窝通常用 0.02 ~ 0.1mm 厚的铝合金箔制造,最常用的厚度是 0.03、0.04、0.05mm。非金属蜂窝常用的材料有纸、玻璃布、塑料和陶瓷等,其中纸蜂窝应用较多。制造蜂窝结构需要三种胶粘剂:粘接蜂窝芯的芯条胶,面板与蜂窝芯粘接的面板胶和稳定蜂窝芯的浸润胶。布蜂窝芯子制备方法主要是胶线粘接拉伸法。涂胶叠层布在一定压力下固化,然后在胶线的垂直方向切断形成蜂窝芯坯料,切断的高度就是蜂窝芯的高度。将蜂窝芯坯料在加压的方向拉开,就形成形状规整的蜂窝,再经过浸胶、固化、定型就成为布蜂窝芯子。金属蜂窝芯的制造方法有成型法和拉伸法。成型法是先材料压成波纹状,然后将波纹状材料叠合胶接而成,这种方法用于厚度大或刚性大的材料,或特殊的非正六边形蜂格的蜂窝。拉伸法是在材料上涂胶条,然后将材料叠合胶接起来,最后再将叠合胶接起来材料拉伸成蜂窝<sup>[1~5]</sup>。

### 1.2 性能表征

描述蜂窝夹层结构力学性能的主要指标有侧压性能、弯曲性能、平压性能、剪切性能等<sup>[6~23]</sup>。

#### (1) 平压性能

利用均匀化方法,将蜂窝芯折合成相当均质体,面板、夹心采用串联模型,计算蜂窝夹层结构平压模量

$$\frac{1}{E_x} = \frac{1}{E_{tz}} \frac{2t}{H} + \frac{1}{E_{cz}} \frac{h}{H} \quad (1)$$

蜂窝芯是由单、双层蜂壁结构组成的,其平压破坏过程是从芯子单层斜壁的失稳开始,或双层纵向壁达到其最大承载能力而发生最终破坏。平压的最大承载能力有三种不同的判据:( )应力达到失稳临界应力,( )应力达到失稳后最大平均应力,( )应力达到材料的压缩强度。根据不同的破坏形式,蜂窝夹层结构可以得到不同的平压强度。

( )斜壁平均应力达到失稳后最大平均应力,视为破坏而不再承载,此时,夹层结构的最大平均应力为

$$\sigma_{\max} = 2.1 \sqrt{\frac{1}{B} E (t_s / c)^2} \quad (2)$$

( ) 破坏以纵壁应力达到其材料压缩强度控制时,夹层结构的最大平均应力为

$$z_{\max} = 0.8 (t_s / c) \bar{\sigma}_B \quad (3)$$

( ) 破坏以纵壁的失稳临界应力控制,夹层结构的最大平均应力为

$$z_{\max} = 9.9 \frac{E}{(1 - \nu^2)} \left( \frac{t_s}{c} \right)^3 \quad (4)$$

(2) 侧压性能

由于蜂窝芯子在夹层结构面内无承载能力,芯子面内刚度近似为零。蜂窝夹层结构面内弹性模量可表示为

$$E = E_f \frac{2t}{H} \quad (5)$$

侧压强度来源是面板,但面板很薄,承受不了大的压缩载荷,需要芯子的支撑,使面板避免屈曲失稳,从而承受较大的载荷。侧压破坏形式主要有芯子剪切失稳、面板皱曲失稳和面板与芯子分层开裂破坏三种形式。

夹层板芯子剪切失稳时,如果计及芯子的剪切变形,夹层板的总体稳定的临界载荷可简化为

$$\frac{1}{P_{cr}} = \frac{1}{P} + \frac{1}{F_c G_c} \quad (6)$$

当芯子剪切模量较小时,夹层板因芯子剪切失稳的临界应力为

$$\sigma_{cr} = \frac{F_c G_c}{2 t_f} \quad (7)$$

当夹层结构中芯材的密度较大且芯子较厚时,不大会发生芯子的剪切失稳,此时面板皱曲失稳显得更重要。当考虑到芯子的剪切变形时,可求得夹层结构的最小面板临界应力为

$$\sigma_{cr} = 0.86 (E_f E_c G_c)^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

(3) 剪切和弯曲性能

面板、夹心采用串联模型,并考虑芯子在面内无承剪能力,面内剪应力为

$$G_{xy} = G_{fxy} \frac{2t}{H} \quad (9)$$

当蜂窝夹层结构受到面内(xy)的剪力作用时,由于芯子在这个方向上的剪切强度很小,剪应力完全由面板承担,剪切强度为

$$\tau_{xy} = 2 \frac{t_f}{h} \tau_f \quad (10)$$

弯曲强度为

$$\sigma_{f1} = \frac{M}{t_f h b} \quad (11)$$

$$c = \frac{Q}{h b} \quad (12)$$

## 2 泡沫金属材料

泡沫金属是一种结构内部含有大量孔隙的、功能与结构一体化的新型材料。泡沫金属材料具有重量轻、高比强、高比刚度、高强韧、高能量吸收等优良机械性能,以及减震、散热、吸声、电磁屏蔽、渗透性优等

特殊性质,是一种性能优异的多功能工程材料。泡沫金属材料在高能耗装备(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。目前,关于泡沫金属的研究主要集中在材料制备工艺和性能表征两方面。

## 2.1 制备工艺

泡沫金属从结构上可分为闭孔和通孔泡沫金属两种。前者含有大量独立存在的气孔,而后者则是连续贯通的三维多孔结构。近年来国内外开发了多种泡沫金属的制备方法,主要分为发泡法、烧结法、铸造法和沉积法等。

### (1) 发泡法<sup>[24~28]</sup>

熔融金属中加入发泡剂或吹入气泡使金属发泡的方法主要包括粉体发泡法和熔融金属发泡法。粉体发泡法是将金属粉末和发泡剂粉末混匀,加热到金属熔点以上,使之发泡,既适于铝和镁等熔点低的金属,又适于熔点较高的金属。熔融金属发泡法是将发泡剂直接加入到金属熔液中使之发泡。这两种方法是制造泡沫金属的最基本方法。此外还有利用溶解于金属中的气体,在金属凝固时因溶解度的急剧下降而释放,使金属发泡的溶解度差的方法,以及在无重力条件下将氩气等惰性气体吹入金属熔液中使之发泡的无重力混合法等。

### (2) 烧结法<sup>[29~35]</sup>

烧结法是英国 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。简单烧结是于较高温度时物料产生初始液相,在表面张力和毛细管现象的作用下、物料颗粒相互接触,相互作用,冷却后物料发生固结而成为泡沫金属。在制备高孔隙率的泡沫金属时,可以采用含有机支撑物烧结的方法,先把天然海绵或人造海绵切成所需要的形状,使其充分吸收含有金属粉末的浆液,干燥后加热使海绵分解,继续加热使有机金属化合物分解和使物料烧结,冷却后可得到孔隙率很高的泡沫金属。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。

### (3) 铸造法<sup>[36~39]</sup>

铸造法可分为熔模铸造法和粒状物料周围浇铸法两种。熔模铸造法是先将已经发泡的塑料填充入一定几何形状的容器内,在其周围倒入液态耐火材料,在耐火材料硬化后,升温加热使发泡塑料气化,将液态金属浇注到模具内,在冷却后把耐火材料与金属分开。粒状物料周围浇铸法,是先把粒状物料放置于铸模之内,在其周围浇铸金属,然后把粒状物料溶解,得到泡沫金属。

### (4) 沉积法<sup>[40~42]</sup>

在具有三维网状结构的特殊高分子材料的骨架上沉积各种金属,再经焙烧除去内部的高分子材料,制得泡沫金属。该方法是制造大孔隙率泡沫金属的最简单的方法。制得的泡沫金属富有可挠性,可进行弯曲、切断和深冲等加工。沉积法根据沉积的方式可分为电沉积法、气相沉积法和喷射沉积法等。

## 2.2 性能表征

泡沫金属具有孔隙率高、密度小和比表面积大等特征,在消声、减震、隔热、吸能缓冲、电极材料和电磁屏蔽等应用方面具备多种优异的性能。影响泡沫金属性能的因素有:基体金属的性能、相对密度、孔结构类型、孔结构的均匀性、孔径大小、孔的形状和孔结构的各向异性、孔壁的连接性以及缺陷(如孔壁的不完整性)等。

### (1) 力学性能<sup>[43~46]</sup>

力学性能是结构材料研究和使用的的基本参数。涉及金属泡沫材料力学性能研究的文献较多,关于金属泡沫材料力学性能研究集中在金属泡沫材料静态力学性能、动态力学响应、能量吸收特性以及影响金属泡沫材料力学性能的因素等方面。弹塑性金属泡沫材料单轴拉伸时,应力应变关系明显分为线弹性变形、塑性变形、线性硬化和破坏四个阶段。泡沫金属材料被静态压缩时,应力应变曲线都可以分为三个阶段:弹性段、屈服段及致密段。当应变很小时,应力应变曲线呈线弹性;然后出现一个平台,这时随着应变增大而应力几乎恒定不变;最后随着胞壁被挤压在一起,材料被压实,应力又迅速增大。在动态压缩实验中,

不管泡沫金属的密度为多少,其应力应变响应曲线与准静态压缩条件下的响应曲线是一样的,均经过三个阶段:弹性段、屈服段及致密段。但在动态条件下应力应变响应还有着与准静态下不同的特征:动态条件下的屈服应力比静态条件下的要高,并随着应变率的增加,屈服应力的增加有上升的趋势;动态条件下的平台区应变比静态条件下的稍低,平台区长度稍短。泡沫金属的压缩应力应变响应曲线上出现较长的塑性变形段,这表明泡沫材料在被压缩过程中能够在保持相对较低的应力下吸收大量的压缩能量,泡沫金属的压缩吸能性大小可用单位体积的泡沫材料被压缩到致密段的过程中所吸收的能量来表示。

### (2) 热物理性能<sup>[47-52]</sup>

泡沫金属材料的孔隙率较高,在大量的孔隙中存在低导热系数的空气介质,其隔热性能较实体金属优越,甚至可与一些常用的绝热材料相媲美。文献[47]对泡沫铝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,而文献[48]对泡沫铝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。研究得出结论:(1)导热系数:通孔泡沫铝的表观热系数介于一般金属及合金的导热系数和隔热材料的导热系数之间,且通孔泡沫铝的导热系数随孔隙率增大而减小,并与传热条件有关。闭孔的多孔泡沫金属可用作绝热材料,与其他相应材料相比具有耐高温及强度高的优点。(2)散热能力:通孔多孔泡沫金属具有高的散热能力。强迫对流可显著提高对流换热能力。试验还表明,采用金属与多孔泡沫金属的组合结构有可能开发出新型高效散热器。

### (3) 电磁屏蔽和吸声性能<sup>[53-59]</sup>

泡沫金属材料的电磁屏蔽性能远比常用的含铁粉和含铜粉的涂料优良,其中泡沫铝对电磁波;尤其是对高频电磁波具有优良的屏蔽作用。声波在泡沫金属材料中的传播特性主要考虑两个方面。一是空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<sup>[53]</sup>,即构造连续介质的本构方程及其波动问题的控制方程。在上述模型中,泡沫金属材料都是由平行直通管簇所构成。文献[54]对泡沫金属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,而另一个则与由热和粘性分别决定的特征长度的比值相关。实验发现,纤维直径、纤维绕结方式以及空隙率都是决定多孔金属声吸收效果的重要参量<sup>[57]</sup>。泡沫金属材料的吸声机制除材料本身的阻尼衰减外,渗流在孔隙间的热弹性压缩膨胀、与孔壁摩擦的粘滞耗散以及流过边角所产生的涡也是使声音衰减的主要原因。

## 3 点阵材料

点阵材料是一种模拟分子点阵构型制造出的一种有序超轻多孔材料。点阵材料是由结点和结点间连接杆件单元组成的周期结构材料<sup>[60]</sup>。它的特点是其微观构型均为二维或三维网架体系,网架中的空隙没有用来承载的填充物。这样的设计节省了大量的质量,提高了比刚度和比强度,在同等重量下点阵材料比无序微结构金属泡沫具有更好的力学性能<sup>[61,62]</sup>;网架间的空隙能够执行储油、配置电池等功能化要求:材料的多孔特点满足了进行对流换热以达到温度控制的要求<sup>[63-65]</sup>;网架独特的伸展性能使得其促动、制动和阻尼振动的研究大有发展空间<sup>[66]</sup>;同时,它也具有良好的降低噪音、屏蔽电磁辐射、抗冲击和碰撞吸能能力。

### 3.1 点阵材料制备工艺

英国剑桥大学提出了熔模铸造法工艺制作点阵材料<sup>[67]</sup>。利用注模技术可制备长细比小于5的聚合物结构。可用聚脂做成单层带有定位孔的聚脂牺牲模,按结构排列方式将单层结构叠合成空间点阵结构<sup>[68]</sup>。以聚合物为牺牲模制备砂模,高温下聚合物熔化分解,在砂模中形成点阵空间,将高温熔融状金属熔液缓慢注入砂模,冷却后将砂模破坏,取出得到金属点阵复合材料。利用该工艺可制造八面体点阵材料。利用这种工艺,点阵材料胞元的尺寸可以小到几个毫米,单元直径可以达到1-2mm。

熔模铸造法对熔融状液态金属的流动性提出了很高的要求,一般材料难以实现。并且熔模铸造法工艺流程复杂,成本高。为了得到更为简便的低成本制备方法,发展了冲压折叠成型工艺<sup>[69,70]</sup>。首先对金属平板进行冲切,得到由平面杆系组成的点阵结构。这种平面点阵可以直接作为点阵夹层的面板使用,也

可以进一步在 V 形模具上冲压折叠形成波浪形空间构型,可作为夹层结构的夹芯材料。面板与夹芯间采用焊接或粘结工艺形成夹层体系。这种方法工艺相对简单,适用的金属材料也比较广泛,可以用来制备四面体夹层和金字塔形夹层。

Brittain 等<sup>[71]</sup>介绍了一种利用  $\mu\text{CP}$  和电镀工艺制作点阵材料的工艺。该方法主要用微接触印刷技术制作平面网格体系。利用模具将平面网格体系压制成空间波浪型构形,将各单层体系对垛成三维体系,采用电镀的方式将结构焊接为整体。利用该方法得到的点阵结构单元尺寸可达  $50\mu\text{m}$ 。这种工艺适用于微机电系统。

常见三维点阵材料一般为金属材料,由于纤维复合材料在力学性能、重量以及多功能性方面的优越性,Fan 和 Yang<sup>[72]</sup>研究了复合材料点阵结构的三维编织方法。该工艺的主要特点是先制备夹层面板和预浸纤维束,以面板为基准,在上下面板间有规律的穿插纤维束形成点阵夹层结构。该方法首次在工艺上实现了三维复合材料点阵的制备,但也存在杆单元不规则的缺陷。

制造平面点阵格栅较常用的方法是采用模具工艺<sup>[73,74]</sup>。模具由两层结构组成,底座由预制凹槽的坚硬材料组成,并且材料具有很高的热稳定性。模具的扩展部分由膨胀橡胶材料组成<sup>[75]</sup>。预浸纤维可在模具扩展部的凹槽中采用铺层或缠绕的方法制作格栅的肋板。模具格栅工艺较为复杂,层间剪切强度仍然较弱,嵌锁格栅是制备格栅的另一种相对简单的工艺方法<sup>[76,77]</sup>。基本特点是利用铺层技术或拉挤成型技术制备格栅肋条,再在肋条上加工槽口,将带槽口的肋条对位嵌锁,利用胶和机械嵌锁将肋条紧固,形成点阵格栅结构。虽然材料模量和抗弯强度因周期槽口的出现而折减,但抗剪强度增强。根据这种工艺,Han 和 Tsai<sup>[76]</sup>利用拉挤成型和嵌锁工艺制备了四边形的格栅。这种构型的力学性能并不理想。在此基础上,清华大学课题组<sup>[77]</sup>制备了碳纤维六角形点阵格栅,见图 1。

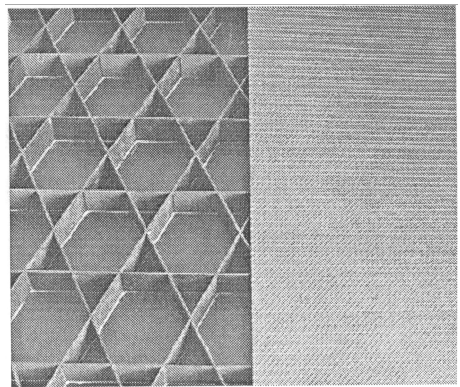


图 1 嵌锁格栅夹层结构

Fig. 1 Interlocked grid sandwich structure

### 3.2 点阵材料构型

构成点阵材料的周期性单胞一般具有二维或三维构型。二维的点阵杆系材料通常包括以下几种构型:(a)正方形胞元;(b)三角形胞元;(c)六角形胞元;(d)混合胞元;(e) Kagome 胞元;(f)矩形胞元;(g)菱形胞元。各种二维点阵结构的构型如图 2 所示。

三维的点阵杆系材料则通常包括以下几种构型:

#### (1) 周期性网架结构(Isotruss)

美国 PYRamatrix 公司开发生产了一种轻质高强的管柱状梁式结构,命名为 Isotruss 结构<sup>[78]</sup>,如图 3(a)所示。结构由纵向单元和螺旋单元组成。当承受屈曲和轴压的时候,结构中螺旋结构主要受扭和横剪并且用来稳定纵向的成员;当承受弯曲、扭转和横向剪切的时候,纵向的结构主要承受轴向压力和屈曲荷载,同时螺旋部分承受弯矩。

#### (2) 编织叠层夹层结构

编织叠层夹层结构是建立在二维编织结构基础之上将层间结点处编织连接到一起的三维编织构型<sup>[79,80]</sup>。典型的编织结构如图 3(b)所示。其制备方案是积层成型,利用钎焊连接平面正交编织金属之间的元件接触点。多层结构的刚度和强度随着密度线性增加,能吸收大量的机械能量且传热能力很好。

#### (3) 全三角型构架

全三角型构架点阵材料是一个有加强杆的八面体结构。如图 3(c)所示,该材料的特点是每个单元均由三角形组成,单元只在 X 和 Y 方向周期展开。对于每个结点,均有 10 根杆件交汇。杆件只受轴向力作用。这种结构的各个方向上的剪应力不是独立的,X - Z 方向上的剪力和 Y - Z 方向上的剪力是耦合的<sup>[81]</sup>。

#### (4) 八面体结构(Octet-truss)

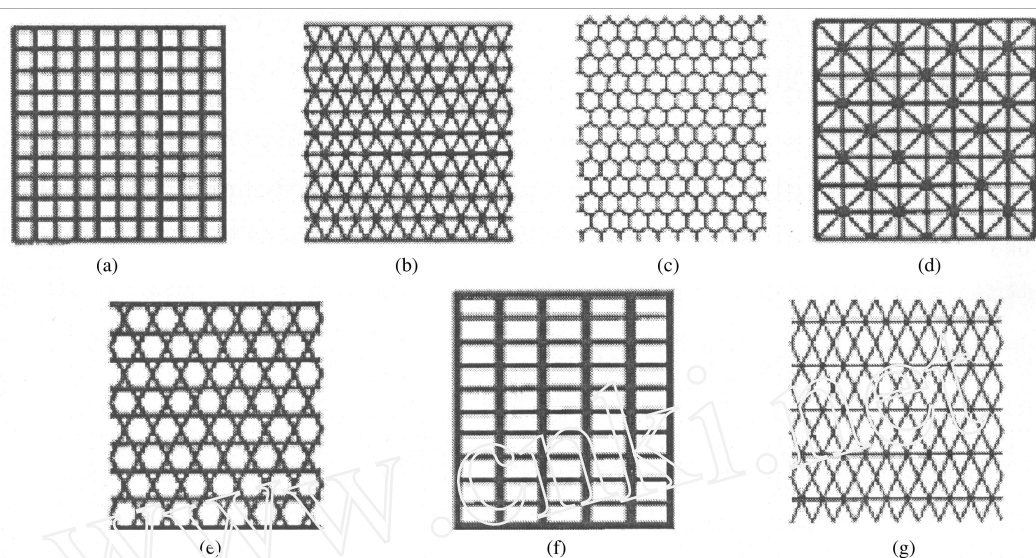


图2 二维点阵结构示意图

Fig. 2 Configurations of different 2D lattice structures

相比全三角形结构,八面体结构减少了其Y方向上的部分杆件。八面体的胞元是一个模拟面心立方(FCC)晶体分子的结构,这个构型可以化为两种简单的单元:白色的四面体元和黑色的八面体元。它的每一个节点的连通性(配位数) $Z = 12$ ,是拉伸主导型的。此结构比全三角形构架相对密度低,承载能力不变,是点阵材料的代表构型<sup>[67,82]</sup>。

#### (5) 四面体(Tetrahedral)和四棱锥(Pyramidal)点阵核芯夹层结构

点阵核芯夹层结构是由两块面板中间夹超静定次数较低的点阵构型而构成的一类点阵材料。比较常见的核芯胞元是正四面体单元和四棱锥单元。这种材料层芯的刚度和强度同八面体结构相当,但有较轻的重量。同时,由于面板的存在使得材料在复杂载荷的作用下和多种静力学和动力学上的状态下,仍能保持稳定。因为航空航天上应用点阵材料终究要有面板的存在,所以此种结构有其应用的合理性<sup>[83]</sup>。

#### (6) Kagome 结构

Kagome 结构是两个正四面体对顶连接的网架结构,如图3(d)。将这种核芯焊接在面板上,就形成了Kagome 夹层板;若将六个Kagome 胞元水平连接成类似蜂窝的正六边形,则形成了Kagome 网架<sup>[84,85]</sup>。与前几种结构不同的是,Kagome 网架或核芯拥有更加稀少的杆件布局和更小的相对密度,并且仍旧保持着其平面内的各向同性性质。这种结构有着良好的促动性能,能够受到很小的内部抵抗力而获得很大范围内的整体变形。Kagome 板是人们目前所能知道的唯一一种同时拥有横观各向同性的刚度和适宜被促动的动力学性能的周期性网架。在同一相对密度的情况下,相比较四面体胞元,它有更强的抗失稳屈曲的能力<sup>[86]</sup>。

### 3.3 性能表征

#### 3.3.1 力学性能

##### (1) 等效模量

对于一维和二维周期结构的力学性能,Noor<sup>[87]</sup>和Abrate<sup>[88-90]</sup>分别对研究成果进行了总结。Noor给出了周期结构连续化的四种典型方法:1)基于力和位移给出材料宏观力学性能的转化关系;2)基于离散单元化给出材料宏观力学性能;3)能量等效方法;4)基于微小变形的均质化方法。随着数值计算技术的发展,应用杆系有限元方法研究点阵材料的力学性能也成为十分有效的方法。

##### (2) 塑性屈服性能

点阵材料强度取决于杆件的破坏力学特征。杆件的破坏存在塑性屈服、脆性断裂、弹性屈曲和塑性屈曲等多种方式,主要取决于杆单元的长细比和材料的脆性特征。Deshpande和Fleck<sup>[82]</sup>等对基于铝合金LM25和硅铜合金MB1制备的全三角点阵夹层结构的压缩试验也存在一段很长的平台,应变达到0.1~

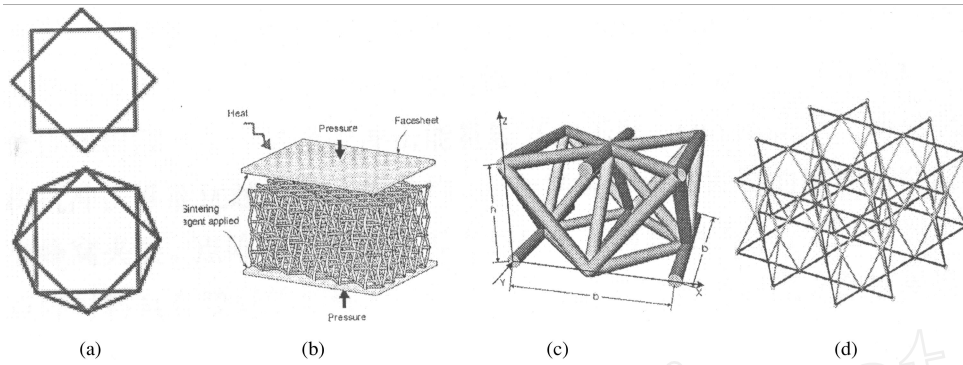


图 3 三维点阵结构胞元示意图

Fig. 3 Configurations of different 3D lattice structures

0.2。剪切试验也存在较长的屈服平台。Deshpande et al.<sup>[67]</sup>系统研究了八角点阵材料的塑性屈服特征,给出了 $(z_z, z_x)$ 、 $(x_x, y_y)$ 和 $(z_z, z_x)$ 空间的塑性屈服面。Mohr<sup>[91]</sup>基于点阵胞元拉压变形机制,提出了点阵材料的多屈服面小应变塑性理论。理论研究了材料在轴向反复加载、纯剪切和三点弯曲条件下的塑性屈服特征。Deshpande 和 Fleck<sup>[82]</sup>研究了三点弯曲作用下点阵夹层材料在 $(z_z, z_x)$ 和 $(z_z, z_x)$ 空间塑性屈服。屈服面为四条直线段包络形成的四边形。Wang 和 McDowell<sup>[93]</sup>研究了二维点阵的屈服面特征,研究表明材料的初始屈服取决于杆件的轴向拉压特征,屈服面为平面,屈服强度正比于材料的相对密度;而材料的后继屈服面取决于杆单元的抗弯性能,后继屈服面为曲面。

### (3) 抗冲击性能

点阵材料具有较强的抗冲击吸能作用。Kooistra et al.<sup>[94]</sup>研究发现,单位体积或单位质量吸收冲击能量较低时,采用蜂窝材料具有优势,但点阵材料更适合于要求单位体积或单位质量吸收冲击能量较高的工况。Qiuet al.<sup>[95,96]</sup>研究表明,夹层结构抗冲击性能优越于单一板结构,而金字塔型点阵夹层的抗冲击性能又强于棱柱型蜂窝夹层。点阵材料的破坏模式与杆单元材料相关。当采用韧性较好的材料时点阵材料具有较好的韧性和吸能作用。Xue 等针对夹层固支圆板受爆炸载荷问题给出了有限元计算分析结果<sup>[97,98]</sup>。分析了折板结构(folded plate)、四棱锥点阵和方形蜂窝结构,结果证实良好设计的点阵夹层材料比同质量下的实心材料具备更好的抗冲击能力。同时,他们进行了点阵结构受冲击载荷作用下的优化计算<sup>[99]</sup>,并针对冲击问题建立了金属夹层材料的本构关系<sup>[100]</sup>。Deshpande 等理论分析了二维波纹状夹层材料(egg-box)的冲击吸能能力<sup>[101]</sup>,画出了它的破坏机制图<sup>[102]</sup>。Rathbun, Radford, McShane 等使用金属泡沫撞击试件来模拟试件受爆炸波冲击载荷的情况<sup>[103]</sup>,实验分析了多种结构的动态响应。Vaughn 等研究了塑性波传播与屈曲耦合作用下四面体胞元的屈曲分析<sup>[104]</sup>。

### (4) 力学性能的综合比较

不同材料制作出来的点阵材料具有不同的等效刚度和强度。对于四面体、四棱锥和八面体点阵三种构型,其弹性刚度系数和初始屈服强度随材料的密度的变化曲线如图 4 和图 5 所示,图中重点比较了不同材料制成点阵材料的刚度和强度。可见,复合材料点阵结构比金属点阵结构有更好的刚度和屈服强度。

对于具有不同微观构型(四面体、四棱锥和八面体点阵以及六角蜂窝)的点阵材料,其刚度和屈服面比较见图 6 和图 7。可见,蜂窝的面外模量的面外比刚度很高,高出了三维点阵材料,而面内模量却低于三维点阵材料。三种三维点阵结构具有相当的弹塑性性能。

### 3.3.2 声、热性能

点阵材料具有良好的传热效率。由于点阵胞元内存在连续通道,流体可以在材料内部流动,同时可以传递热量。在点阵材料的传热性能及力热一体化优化设计方面已经存在大量的详细的研究成果<sup>[104~109]</sup>。

当传热设备同时要求具有一定的承载能力的时候,点阵材料是一种比较好的选择。在低密度高孔隙率的情况下,点阵材料的强度和模量比泡沫材料高出可达一个量级。点阵材料的传热体现在两个方面,金属杆单元的热传导和内部连通空间的流体对流。针对点阵材料的传热效能与结构承载能力,Gu et al.<sup>[106]</sup>



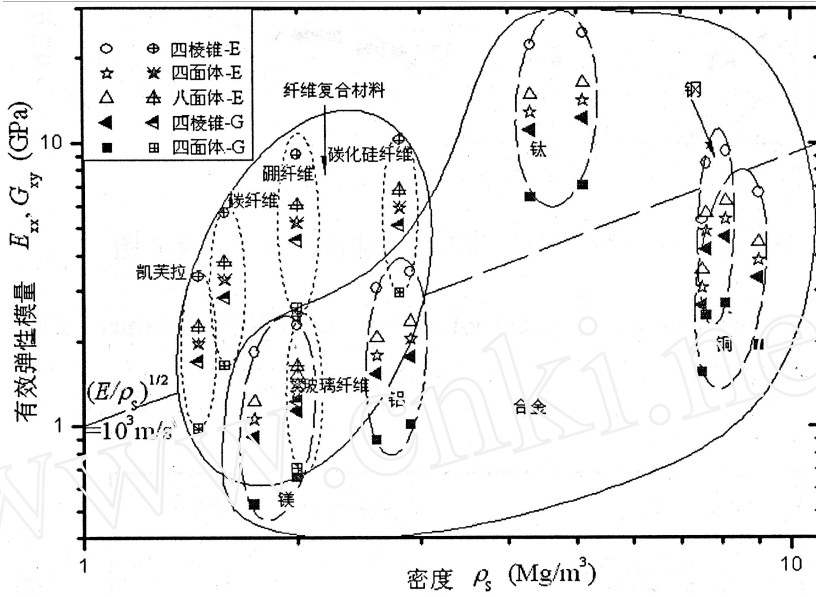


图 4 利用不同材料制备的点阵结构的等效刚度比较图

Fig. 4 Comparisons of effective stiffness for lattice structures made from different materials

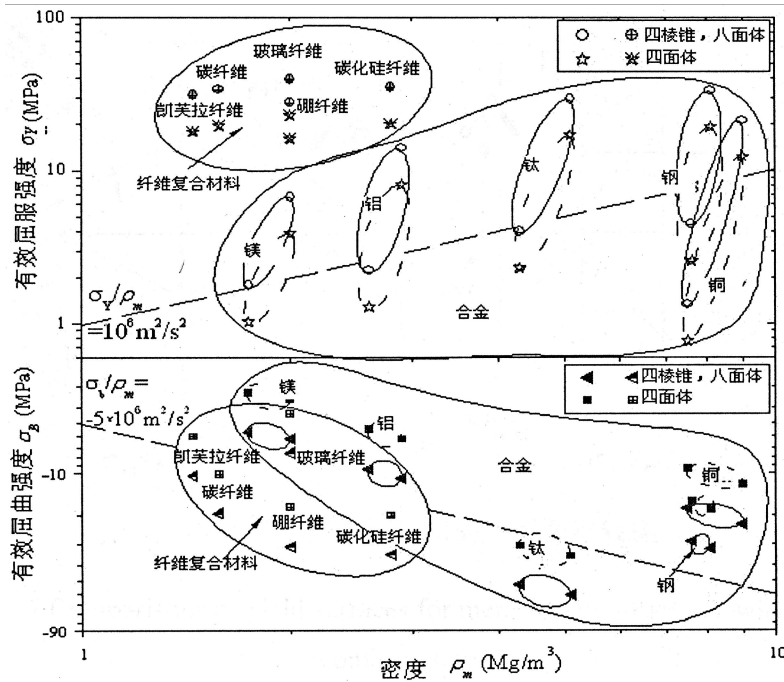


图 5 利用不同材料制备的点阵结构的等效强度比较图

Fig. 5 Comparisons of effective strength for lattice structures made from different materials

优化设计了二维点阵的构型并进行了比较。

Lu 等人理论建模分析了声在轻质折板夹层材料中传播的损耗<sup>[110]</sup>。他们分别利用将折板等效成弹簧的理论模型(smearred model)和周期函数理论分析了声波的转播过程。Lu 等人对铜合金编织点阵材料的热交换性能进行测试和计算<sup>[111]</sup>,发现这种散热介质几乎可以和最好的散热介质相比拟。他们还对四面体点阵材料的热交换性能进行实验测量和有限元模拟<sup>[112]</sup>,发现其热交换性能对点阵杆件的方向和位置敏感。Lu 等人研究了关于在二维棱柱形结构和三维点阵结构夹层板中热液压问题,同时进行了理论研

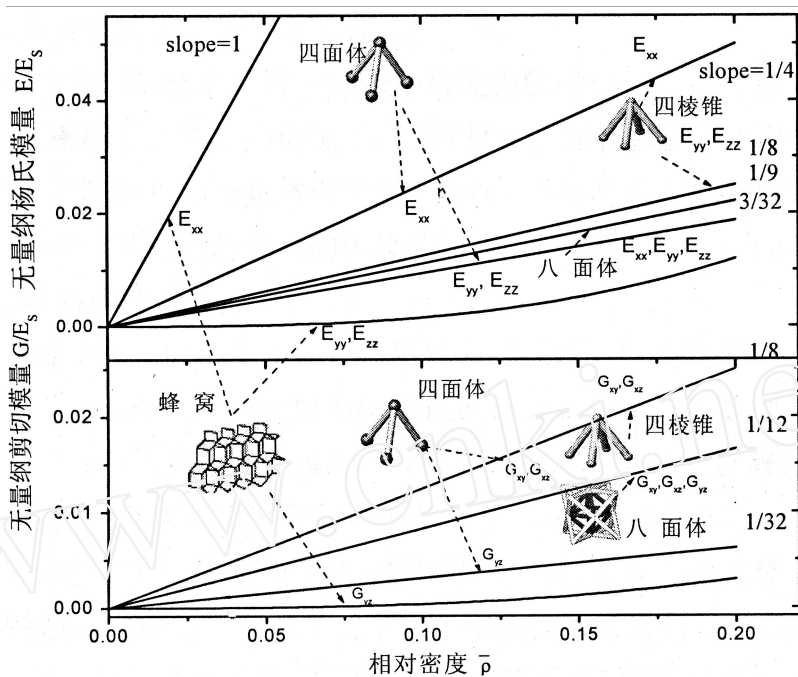


图 6 不同结构等效杨氏模量和剪切模量比较图

Fig. 6 Comparisons of effective elastic modulus and shear modulus for lattice structures with different configurations

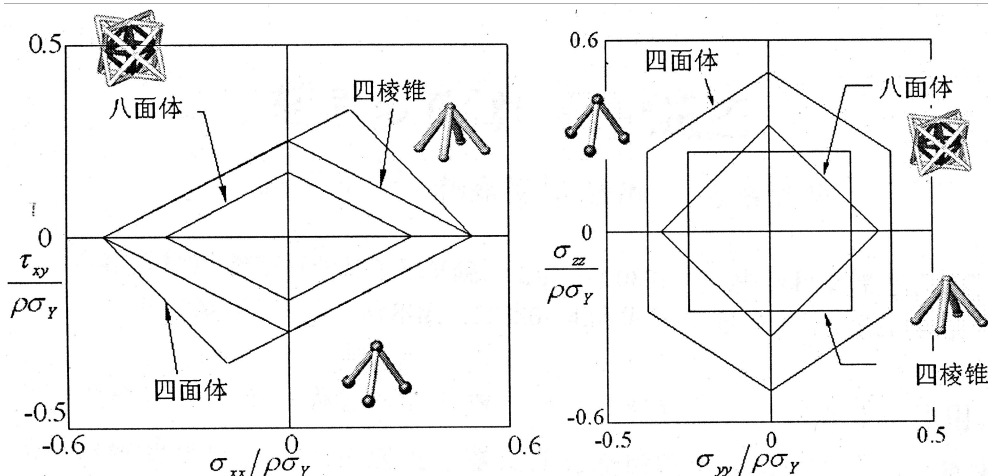


图 7 不同金属结构的屈服面比较图

Fig. 7 Comparisons of yield surfaces for metal lattice structures with different configurations

究、数值模拟和试验验证<sup>[113]</sup>。在此基础上,国内很多学者将以上理论模型结合基于金属泡沫微观结构的对流传热模型,应用于指导热交换器的优化设计,如大型集成电路板的散热控制,以及用于航空器上的空气和燃油对流式热交换器中。

### 3.3.3 促动与致动性能

作为新一代轻质材料的点阵材料,其独特的三维网架体系方便了其实现促动(actuation)和致动等功能化要求。作为促动的基础理论,Guest 和 Hutchinson 在 2003 年证明了一个定理,即无限的周期性变化的结构不能够同时是静定的和运动学决定的<sup>[114,115]</sup>。Wicks 和 Guest 用数值方法计算了三种二维构型(八面体表面的三角形结构,Kagome 形和蜂窝形)的点阵材料促动一根杆件所需要的能量<sup>[116]</sup>。Hutchinson R G 等进而分析了两种三维模型的促动效果,一种是单层 Kagome 核心加一层面板,另一种是双层 Kagome 网架<sup>[117]</sup>。Symons 等分析了促动 Kagome 双层网架结构的单根杆件所需要的力,并且同时其他杆件内力

在容许范围内<sup>[84]</sup>。Lu 分析了折板夹层结构促动优化设计问题,其方法是温度的变化导致形状记忆合金面板弯曲,使得材料整体促动。Lu 和 Evans<sup>[119]</sup>采用电致伸缩的聚合物制备致动夹层结构,面板采用层合板结构,将聚合物放置在面板内,夹芯为开放式三角形波纹结构,随着聚合物的电致伸缩作用,面板产生伸缩运动,带动夹芯弯曲,改变结构形状。Doneva 和 Torquato<sup>[119]</sup>理论研究表明,通过对周期点阵结构中的某些杆件进行致动,在不消耗能量的情况下使点阵结构达到任意均匀的变形场,从而使结构具有自适应能力,并给出了双三角型点阵结构的致动模式。Hutchinson et al.<sup>[117]</sup>研究了混合三角形点阵结构的致动性能。Dos Santos e Lucato et al.<sup>[120]</sup>制备了致动结构并进行了试验研究。

## 4 结束语

高超声速飞行器轻质多功能材料是高超声速飞行器设计与制造的关键技术之一,它关系到高超声速飞行器高速、高机动、长航时、高精度打击等关键性能的实现。高超声速飞行器轻质材料,特别是点阵材料是近年来随着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材料,它的出现为高超声速飞行器设计与制造提供了性能优异的结构功能一体化材料。经过几十年的不懈努力,高超声速飞行器轻质材料在材料制备技术、材料微结构优化设计、力学和热物理性能表征方面都取得了突破性进展。但随着人们对高超声速飞行器性能指标要求的不断提高,现有的高超声速飞行器轻质材料还难以满足要求。为满足现代国防发展对高超声速飞行器轻质材料的需求,笔者认为需要在以下方面进一步加强研究:

- (1) 高超声速飞行器轻质材料,特别是树脂基点阵复合材料制备工艺;
- (2) 高超声速飞行器轻质材料微细观组织与结构的优化设计理论;
- (3) 各种缺陷对高超声速飞行器轻质材料性能的综合影响;
- (4) 点阵材料完备的理论框架和细、微观模型;
- (5) 大规模数值模拟。

## 致谢

本项目获得国家 973 和国家自然科学基金委的资助,特此表示感谢。

## 参考文献:

- [1] 王玉瑛,吴荣煌. 蜂窝材料及孔格结构技术的发展[J]. 航空材料学报,2000,20(3):172-177.
- [2] 张广平,戴干策. 复合材料夹心板及其应用[J]. 纤维复合材料,2000,2:26-29.
- [3] 李勇. 直九用 Nomex 蜂窝研究[J]. 航空材料学报,1996,3:47-54.
- [4] 韩立军. 蜂窝夹层结构共固化成型工艺[A]. 航空复合材料技术成果文集[C]. 航空工业出版社,1993.
- [5] 王兴业,杨孚标,曾竟成,肖加余. 夹层结构复合材料设计原理及其应用[M]. 北京:化学工业出版社,2007.
- [6] 赖士洪,唐发伦. 胶接铝蜂窝结构的剥离破坏分析[J]. 航空材料,1989,3:22-28.
- [7] 周祝林,杨云娣. 夹层结构滚筒剥离试验方法[J]. 玻璃钢,1991,2:28-32.
- [8] 张汝光. 玻璃钢蜂窝夹层结构的平压破坏形式和强度预测[J]. 玻璃钢,1999,2:1-7.
- [9] 周祝林. 蜂窝夹层板的极限强度[J]. 力学学报,1983,1:63-69.
- [10] Cowin S C. The relationship between the elasticity tensor and the fabric tensor[J]. Mech Mater,1985,4:137-147.
- [11] Davidge R W. Mechanical Behavior of Ceramic[M]. Cambridge University Press, Cambridge, 1979.
- [12] Eischen J W, Torquato. Determining elastic behavior of composites by the boundary element method[J]. J Appl Phys, 1993,74:159-170.
- [13] Evans K E. Tensile network microstructures exhibiting negative Poisson's ratios[J]. J Phys D,1989,22:1870-1876.
- [14] Gibson L J, Ashby M F, Zhang J, Triantafillou T C. Failure surfaces for cellular materials under multiaxial loads I: modeling[J]. Int J Mech Sci,1989,31:635-663.
- [15] Grediac M. A finite element study of the transverse shear in honeycomb cores[J]. Int J Solids Structures,1993,30:1777-1788.
- [16] Hollister S J, Fyhrie D P, Jepsen K J, Goldstein S A. Application of homogenization theory to the study of trabecular bone mechanics[J]. J Biomechanics,1991,24:825-839.
- [17] Huang J S, Gibson L J. Fracture toughness of brittle honeycombs[J]. Acta Metall Mater,1991,39:1617-1626.

- [18] Klinworth J W, Stronge W J. Plane punch indentation of a ductile honeycomb[J]. *Int J Mech Sci*, 1989, 31:359 - 378.
- [19] Kraynik A M, Reinelt D A, Princen H. M. The nonlinear elastic behavior of polydisperse hexagonal foams and concentrated emulsions [J]. *J Rheol*, 1991, 35:1235 - 1253.
- [20] Lakes R S. Deformation mechanisms in negative Poisson's ratio materials: structural aspects[J]. *J Mat Sci*, 1991, 26:2287 - 2292.
- [21] Papka S D, Kyriakides S. In - plane compressive response and crushing of honeycomb[J]. *J Mech Phys Solids*, 1994, 42:1499 - 1532.
- [22] Zhang J, Ashby M F. The out-of-plane properties of honeycombs[J]. *Int J Mech Sci*, 1992, 34:475 - 489.
- [23] Zhang J, Ashby M F. Buckling of honeycombs under in-plane biaxial stress[J]. *Int J Mech Sci*, 1992, 34:491 - 509.
- [24] I Duarte, J Banhart. A Study of aluminium foam formation kinetics and microstructure[J]. *Acta mater*, 2000, 48:2349 - 2362.
- [25] J Banhart, et al. Metal foam evolution by synchrotron radiography[J]. *Applied Physics Letters*, 2001, 178(9):1152 - 1154.
- [26] J Banhart, et al. Real-time X-ray Investigation of Aluminum Foam Sandwich Production[J]. *Advanced Engineering*, 2001, 3(6):407 - 411.
- [27] 吴铿. 泡沫冶金熔体的基础理论[M]. 北京:冶金工业出版社, 2000. 125 - 128.
- [28] 左孝青, 顾昆. 泡沫铝发泡过程动力学[J]. *昆明理工大学学报*, 2003, 28(3):6 - 9.
- [29] Allen B C. US Patent 3087807[P], 1963.
- [30] Banhart J. *Euro Physics News*, 1999, 30(17).
- [31] 刘菊芬, 刘荣佩, 史庆南, 左孝青. 新型泡沫铝制备工艺研究[J]. *材料导报*, 2002, 16(8):65 - 67.
- [32] C Park, S R. Nutt. PM synthesis and properties of steel foams[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2000, 288:111 - 118.
- [33] Park C, Nutt S R. Effects of parameters on steel foam synthesis. *Materials Science and Engineering A*, 2001, 297:62 - 68.
- [34] Kulkarni S B, Ramakrishnan P. Foamed aluminum[J]. *Inter Journal of Powder Metallurgy*, 1973(9):41 - 45.
- [35] Han F S, Zhu Z G. *Metallurgical and Materials Transactions :A Physical Metallurgy and Materials Science* [J]. 1999, 30:165 - 170.
- [36] Gergely V, Curran D C, Clyne T W. *Processing and Properties of Lightweight Cellular Metals and Structure*[C]. Edited by Amit Ghosh, Tom Sanders and Dennis Clar, TMS, 2002:97 - 104.
- [37] 张勇, 等. 用低压渗流法制备泡沫铝合金[J]. *材料科学进展*, 1993, 7(6):473 - 477.
- [38] 许庆彦, 陈玉勇, 李庆春. 多孔泡沫金属的研究现状[J]. *铸造设备研究*, 1997, (1):21.
- [39] 王录才, 等. 熔模铸造法通孔泡沫铝制备工艺研究[J]. *铸造*, 1999, (1):8 - 10.
- [40] Badiche X, et al. *Materials Science and Engineering A*[J]. 2000, 289:176.
- [41] Allen B C. US Patent 3087807[P]. 1963.
- [42] Banhart J. *Euro physics News*[J]. 1999, 30(17):525 - 537.
- [43] Gibson L J, Ashby M F. *Cellular Solids: Structure and Properties*, 2nd ed[M]. Cambridge University Press, Cambridge, 1997.
- [44] 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[J]. *Acta Mater*, 1997, 45:5245-5259.
- [45] McCullough K Y G, Fleck N A, Ashby M F. Toughness of aluminium alloy foams[J]. *Acta Mater*, 1999, 47:2331 - 2343.
- [46] Chen C, Fleck N A, Lu T J. The mode I crack growth of metallic foams[J]. *J Mech Phys Solids*, 2001, 49:231 - 259.
- [47] Calmidi V V, Mahajan R L. Forced convection in high porosity metal foams[J]. *J Heat Transfer*, 2000, 122:557 - 565.
- [48] Boomsma K, Poulikakos D. The effects of compression and pore size variations on the liquid flow characteristics in metal foams[J]. *ASME J of Fluids Engineering*, 2001, 124:263 - 272.
- [49] Kumar A, Reddy R G. Materials and design development for bipolar/ end plates in fuel cells[J]. *Journal of Power Sources*, 2004, 129:62 - 67.
- [50] Lu T J, Stone H A, Ashby M F. Heat transfer in open-cell metal foams[J]. *Acta Mater*, 1998, 46:3619 - 3635.
- [51] Zhao C Y, Lu T J, Hodson H P. Thermal radiation in metal foams with open cells[J]. *Int J Heat and Mass Transfer*, 2004, 47:2927 - 2939.
- [52] Zhao C Y, Kim T, Lu T J, Hodson H P. Thermal transport in high porosity cellular metal foams[J]. *J Thermophysics and Heat Transfer*, 2004, 18:309 - 317.
- [53] Biot M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid[J]. *J Acoust Soc Am*, 1955, 28(2):168 - 191.
- [54] Allard J F, Champoux Y. New empirical equations for sound propagation in rigid frame fibrous materials[J]. *J Acoust Soc Am*, 1992, 91:3346 - 3353.
- [55] Wilson D K. Relaxation-matched modeling of propagation through porous media, including fractal pore structure[J]. *J Acoust Soc Am*, 1993, 94:1136 - 1145.
- [56] Dupere I D J, Dowling A P, Lu T J. The absorption of sound in cellular foams[J], *ASME International Mechanical Engineering Congress*, IMECE2004-60618, 2004.
- [57] Zorin V A, Ivanchuk A A, Karpinos D M, Rutkovskii A E, Smirnov V G. Effect of geometric structure parameters on the sound absorbing properties of a metal fiber material[J]. *Poroshkovaya Metallurgiya*, 1980, 11:43 - 47.
- [58] Lu T J, Hess A, Ashby M F. Sound absorption in metallic foams[J]. *J Appl Phys*, 1999, 85:7528 - 7539.

- [59] Lu T J, Chen F, He D. Sound absorption of cellular metals with semiopen cells[J]. *J Acoust Soc Am*, 2000,108(4):1697 - 1709.
- [60] Evans A G, Hutchinson J W, Fleck N A, et al. The topological design of multifunctional cellular metals[J]. *Progress in Mater Sci*, 2001, 46(3~4):309 - 327.
- [61] Evans A G. Light weight materials and structures[J]. *MRS Bulletin*, 2001,Oct:790 - 797.
- [62] Ashby M F. Multi-objective optimization in material design and selection[J]. *Acta Mater*, 2000,48:359 - 369.
- [63] Kim T, Hodson H P, Lu T J. Fluid-flow and end wall heat-transfer characteristics of an ultralight lattice-frame material. *Int[J]. J Heat and Mass Transfer*, 2004, 47:1129 - 1140.
- [64] 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 ultralightweight lattice material[J]. *Int J Heat and Mass Transfer*, 2005, 48:4243 - 4264.
- [65] Lu T J, Valdevit L, Evans A G. Active cooling by metallic sandwich structures with periodic cores[J]. *Prog Mater Sci*, 2005,50:789 - 815.
- [66] Wicks N. Optimization and actuation of truss structures[D]. Ph D dissertation: The division of engineering and Applied Sciences, Harvard University,2003.
- [67] Deshpande V S, Fleck N A, Ashby M F. Effective properties of the octet-truss lattice material[J]. *J Mech Phys Solids*, 2001,49:1747 - 1769.
- [68] Wallach J C, Gibson L J. Defect sensitivity of a 3D truss material[J]. *Scripta Materialia*, 2001,45:639 - 644.
- [69] Wadley H N G, Fleck N A, Evans A G. Fabrication and structural performance of periodic cellular metal sandwich structures[J]. *Composites Science and Technology*, 2003, 63:2331 - 2343.
- [70] Sugimura Y. Mechanical response of single-layer tetrahedral trusses under shear loading[J]. *Mech Mater*, 2004,36:715 - 721.
- [71] Brittain S T, Sugimura Y, Schueller O J A, et al. Fabrication and mechanical performance of a mesoscale space-filling truss system[J]. *J Microelectromechanical Systems*, 2001,10(1):113 - 120.
- [72] Fan H L, Yang W, Wang B, et al. Design and manufacturing of a composite lattice structure reinforced by continuous carbon fibers[J]. *Tsinghua Science and Technology*, 2006(in press).
- [73] Houl A, Gramoll K. Design and fabrication of CFRP interstage attach fitting for launch vehicles[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 1999,12(3):83 - 91.
- [74] Vasiliev V V, Barynin V A, Rasin A F. Anisogrid lattice structures—survey of development and application[J]. *Composite structures*, 2001,54:361 - 370.
- [75] Huybrechts S M, Meink T E, Wegner P M, et al. Manufacturing theory for advanced grid stiffened structures[J]. *Composite:part A*, 2002,33:155 - 161.
- [76] Han D Y, Tsai S W. Interlocked composite grids design and manufacturing[J]. *J Composite Mater*, 2003,37:287 - 316.
- [77] 范华林,孟凡颢,杨卫. 碳纤维格栅结构力学性能研究[J]. *工程力学*,2006(in press).
- [78] Jensen D W. A glimpse into the world of innovative composite isotruss TM Grid structure[J]. *SAMPE J*, 1999,36(5):117 - 128.
- [79] Sypek D J, Wadley H N G. Multifunctional microtruss laminates: Textile synthesis and properties[J]. *J Mater Res*, 2001,16(3):890 - 897.
- [80] Zupan M, Deshpande V S, Fleck N A. The out-of-plane compressive behaviour of woven-core sandwich plates[J]. *Euro J Mech A/Solids*, 2004,23:411 - 421.
- [81] Wallach J C, Gibson L J. Mechanical behavior of a three-dimensional truss material[J]. *Int J Solids Struct*, 2001,38:7181 - 7196.
- [82] Deshpande V S, Fleck N A. Collapse of truss core sandwich beams in 3-point bending[J]. *Int J Solids Struct*, 2001,38:6275 - 6305.
- [83] 方岱宁,郭海成,Soh A K,卢天健. 轻质点阵材料的力学行为分析[A]. 首届全国航空航天领域中的力学问题学术研讨会论文集[C]. 北京:中国力学学会,2004. 下册:22 - 24.
- [84] Symons D D, Hutchinson R G, Fleck N A. Actuation of the Kagome Double-Layer Grid Part 1 Prediction of performance of the perfect structure[J]. *J Mech Phys Solids*, 2005,53:1855 - 1874.
- [85] Symons D D, Hutchinson R G, Fleck N A. Actuation of the Kagome Double-Layer Grid Part 2 Effect of imperfections on the measured and predicted actuation stiffness[J]. *J Mech Phys Solids*, 2005,53:1875 - 1891.
- [86] Wang J, Evans A G, Dharmasena K, Wadley H N G. On the performance of truss panels with Kagome cores[J]. *Int J Solids Struct*, 2003, 40:6981 - 6988.
- [87] Noor A K. Continuum modeling of repetitive lattice structures[J]. *Applied Mechanics Review*, 1988,41:285 - 296.
- [88] Abrate S. Continuum modeling of latticed structures[J]. *Shock and Vibration Digest*, 1985,17(1):15 - 21.
- [89] Abrate, S. Continuum modeling of latticed structures[J]. *Shock and Vibration Digest*, 1988,20(10):3 - 8.
- [90] Abrate, S. Continuum modeling of latticed structures: part [J]. *Shock and Vibration Digest*, 1991,23(3):16 - 21.
- [91] Mohr D. Mechanism-based multi-surface plasticity model for ideal truss lattice materials[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2005,42(11~12):3235 - 3260.
- [92] Chen J Y, Huang Y, Ortiz M. Fracture analysis of cellular materials:A strain gradient model[J]. *Journal of the Mechanics and Physics*

- of Solids, 1998,46(5):789 - 828.
- [93] Wang A J, McDowell D L. In-plane stiffness and yield strength of periodic metal honeycombs[J]. ASME Journal of Engineering Materials and Technology, 2004,126:137 - 156.
- [94] Kooistra G W, Deshpande V S, Wadley H N G. Compressive behavior of age hardenable tetrahedral lattice truss structures made from aluminium[J]. Acta Materialia, 2004,52:4229 - 4237.
- [95] Qiu X, Deshpande V S, Fleck N A. Finite element analysis of the dynamic response of clamped sandwich beams subject to shock loading [J]. European Journal of Mechanics-A/Solids, 2003, 22(6):801 - 814.
- [96] Qiu X, Deshpande V S, Fleck N A. Impulsive loading of clamped monolithic and sandwich beams over a central patch[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2005,53(5):1015 - 1046.
- [97] Xue Z Y, Hutchinson J W. Preliminary assessment of sandwich plates subject to blast loads[J]. Int J Mechanical Sciences, 2003,45:687 - 705.
- [98] Xue Z Y, Hutchinson J W. A comparative study of impulse-resistant metal sandwich plates[J]. Int J Impact Engineering, 2004,30:1283 - 1305.
- [99] Xue Z Y, Hutchinson J W. Constitutive model for quasi-static deformation of metallic sandwich cores[J]. Int J Numer. Meth Engng, 2004,61:2205 - 2238.
- [100] Hutchinson J W, Xue Z Y. Metal sandwich plates optimized for pressure impulses[J]. Int J Mech Sci, 2005,47:545 - 569.
- [101] Deshpande V S, Fleck N A. Energy absorption of an egg-box material[J]. J Mech Phys Solids, 2003,51:187 - 208.
- [102] Deshpande V S, Fleck N A. One-dimensional response of sandwich plates to underwater shock loading[J]. J Mech Phys Solids, 2005, 53:2347 - 2383.
- [103] Radford D D, Deshpande V S, Fleck N A. The use of metal foam projectiles to simulate shock loading on a structure[J]. Int J Impact Engineering, 2005,31:1152 - 1171.
- [104] Vaughn D G, Canning J M, Hutchinson J W. Coupled plastic wave propagation and column buckling[J]. ASME J Appl Mech, 2005, 72:139 - 146.
- [105] Lu T J, Valdevit L, Evans A G. Active cooling by metallic sandwich structures with periodic cores[J]. Progress in Materials Science, 2005, 50:789 - 815.
- [106] Gu S, Lu T J, Evans A G. On the design of two-dimensional cellular metals for combined heat dissipation and structural load capacity [J]. Int J Heat Mass Transfer, 2001, 44:2163 - 2175.
- [107] Kim T, Zhao C Y, Hodson H P, et al. Convective heat dissipation with lattice-frame materials[J]. Mech Mater, 2004,36:1011 - 1020.
- [108] Kim T, Hodson H P, Lu T J. Fluid-flow and heat-transfer in ultralight weight lattice-frame materials[J]. Int J Heat Mass Transfer, 2004, 47:1129 - 1140.
- [109] Kim T, Hodson H P, Lu T J. Pressure loss and heat transfer mechanisms in a lattice-frame structured heat exchanger[J]. J Mech Eng Sci, 2004,218:1321 - 1336.
- [110] Wang J, Lu T J, Woodhouse J, Langley R S, Evans J. Sound transmission through lightweight double-leaf partitions: theoretical modeling[J]. J Sound and Vibration, 2005,286:817 - 847.
- [111] Tian J, Kim T, Lu T J, Hodson H P, Queheillat D T, Syceck D J, Wadley H N G. The effects of topology upon fluid-flow and heat-transfer within cellular copper structures[J]. Int J Heat and Mass Transfer, 2004,47:3171 - 3186.
- [112] Kim T, Hodson H P, Lu T J. Fluid-flow and end wall heat-transfer characteristics of an ultralight lattice-frame material[J]. Int J Heat and Mass Transfer, 2004,47:1129 - 1140.
- [113] Lu T J, Valdevit L, Evans A G. Active cooling by metallic sandwich structures with periodic cores[J]. Prog Mater Sci, 2005,50:789 - 815.
- [114] Guest S D, Hutchinson J W. On the determinacy of repetitive structures[J]. J Mech Phys Solids, 2003,51:383 - 391.
- [115] Fowler P W, Guest S D. A symmetry extension of Maxwell's rule for rigidity of frames[J]. Int J Solids Struct, 2000 37:1793 - 1804.
- [116] Wicks N, Guest S D. Single member actuation in large repetitive truss structures[J]. Int J Solids Struct, 2004, 41:965 - 978.
- [117] Hutchinson R G, Wicks N, Evans A G, Fleck N A, Hutchinson J W. Kagome plate structures for actuation[J]. Int J Solids Struct, 2003, 40:6969 - 6980.
- [118] Lu T J, Evans A G. Design of a high authority flexural actuator using an electrostrictive polymer[J]. Sensors and Actuators A:Physical, 2002,99(3):290 - 296.
- [119] Doneva A, Torquato S. Energy-efficient actuation in infinite lattice structures[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2003,51:1459 - 1475.
- [120] Dos Santos e Lucato S L, Wang J, Maxwell P, et al. Design and demonstration of a high authority shape morphing structure[J]. International Journal of Solids and Structures, 2004,41:3521 - 3543.