

# 超轻质微点阵结构金属材料的研究进展

戴贵鑫, 吴士平

(哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 黑龙江哈尔滨 150001)

**摘要:** 概述了近年来轻质及超轻质微点阵结构金属材料的研究发展状况, 包括材料的结构、制备工艺、力学性能及应用情况, 并在此基础上进行了归纳、整理, 对超轻质微点阵结构金属材料将来可能应用的领域进行预测, 同时, 对超轻质微点阵结构金属材料未来的研究与发展进行了展望。

**关键词:** 超轻质; 多孔结构; 金属; 高比强度; 微点阵结构

为了提高飞行器的服役性能, 对航空航天领域所使用的金属材料提出了很高的轻量化要求。在减震、传热与生物支架等方面, 金属材料的轻质结构也有着极大的应用前景。因此, 轻质及超轻质多孔结构金属材料的研究与开发对推动超轻材料的发展, 对航空航天及国民产业的推进具有重要而深远的科学意义和应用价值。

一般而言, 我们将表观密度低于 $10 \text{ mg/cm}^3$ 的材料定义为超轻质材料<sup>[1]</sup>。超轻质材料家族的成员目前还比较少, 仅有气凝胶材料、泡沫聚合物材料以及泡沫金属材料等。其中泡沫金属材料的表观密度处于 $10 \text{ mg/cm}^3$ 的界限处, 因此, 关于超轻质金属材料的研究还有着很大的探索空间。在2011年, T. A. Schaedler的金属微点阵材料研究为金属材料的超轻质化打开了一扇新的大门<sup>[1]</sup>, 此后, 该类材料迅速成为超轻质金属材料研究的热点。

本研究就轻质及超轻质多孔结构金属材料的研究发展作了总结, 包括材料的结构设计、制备工艺以及力学性能等。希望通过对超轻质微点阵结构金属材料的发展回顾, 为该方面金属材料的探索提供相应的理论支持和研究思路。

## 1 轻质及超轻质微点阵结构金属材料的结构与制备工艺

早在1948年B.Sosnik<sup>[2]</sup>就通过气化汞的方法得到了泡沫铝材料, 开辟了通过改变金属成形的结构而改变金属表观密度从而制备轻质金属的先河。自此以后, 泡沫金属的概念被广泛推广。由于泡沫金属表观密度远远小于同种金属而被广泛应用于对表观密度有要求的领域。这类泡沫金属只能称为轻质材料。

随着对泡沫金属的深入研究, 由相互连通或闭合孔隙组成的泡沫金属结构被广泛认知, 其结构如图1<sup>[3]</sup>所示。这些孔隙的大小、数量、均匀性、连通及封闭的状态都将对材料性能造成影响。其中, 主要参数包括孔径、总孔隙度和有效孔隙度、孔隙度、表观密度及比表面积等<sup>[3]</sup>。

根据制备工艺的特点, 泡沫金属的制备可以分为三大类: 基于金属熔体的液态金属凝固法; 基于金属粉末的固态金属烧结法; 基于金属蒸气的金属沉积法。其中, 液态金属凝固法包括渗流铸造法、熔体发泡法、熔模铸造法、气体注入法; 固态金属烧结法包括金属中空球烧结法、金属粉末烧结法、浆料烧结法; 金属沉积法包括气相蒸发沉积法、喷射夹气沉积法、喷雾夹带沉积法、电沉积法<sup>[3-5]</sup>。

然而, 这些泡沫金属孔隙结构的生成有着随机性, 各方面的性能受到相当大的影响。因此, 研究者们就轻质金属材料的结构方面进行了深入的设计研究, 设计出

作者简介:

戴贵鑫(1993-), 男, 博士生, 主要研究方向为金属凝固及超轻质材料。  
E-mail: 707390881@qq.com

中图分类号: TG113.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2020)01-0001-10

基金项目:

国家自然科学基金(51475120); 航天先进制造技术研究联合基金(U1537201)。

收稿日期:

2019-05-13 收到初稿,  
2019-10-05 收到修订稿。

了四棱锥<sup>[6]</sup>、八面体<sup>[7]</sup>、3D-Kagome<sup>[8]</sup>等多种有序三维金属多孔结构，即金属点阵材料。为了得到这些有序的多孔结构，研究者们开发了多种制备的方法，如熔模铸造法<sup>[7]</sup>、冲压成型法<sup>[9]</sup>、搭接拼装法<sup>[10]</sup>、挤压线切割法<sup>[11]</sup>、金属丝编织法<sup>[12]</sup>等。这些制备方法有着各自的优点和不足，但均为超轻质微点阵结构金属材料的研究奠定了有利的基础。

随着快速成形技术的发展，3D打印以及相关技术为有序多孔结构的设计制备提供了新的方式和方向，金属微点阵材料应运而生。2011年，英国利物浦大学的R. Mines等人利用SLM技术制作了以Ti-6Al-4V<sup>[13]</sup>和不锈钢<sup>[14]</sup>为材料的微点阵结构材料，其结构均为以BCC（体心立方）结构为核心的单元格进而组成宏观结构，其组成框架的圆柱结构均为实心，如图2<sup>[14]</sup>所示。其中，每个单元格尺寸为2.5 mm。另外，通过对单元格的尺寸以及角度设计，将单元格结构扩展为BCCZ（带有Z轴方向垂直支柱的体心立方）结构和F<sub>2</sub>BCC（带有两个对角面支柱的体心立方）结构<sup>[15]</sup>。并且，通过引入化学镀的方法对材料结构表面性能进行强化<sup>[16]</sup>。

同年，美国HRL实验室的T. A. Schaedler等<sup>[1]</sup>发表了关于制备超轻质金属微点阵材料的研究。开创了超轻质结构材料的新纪元，通过自蔓延光聚合物波导技术制作聚合物模板，并利用化学镀方法对模板表面施加镍镀层，最后用化学刻蚀的方法去除内部聚合物，得到由空心镍管组成的金属微点阵材料。材料结构与BCC结构相似，材料尺寸跨域了3个级别：从纳米级别的镀层壁到微米级别的空心管再到毫米级别的单元格结构。制备方法与材料结构如图3所示。

之后，对聚合物模板的结构、圆柱尺寸和镀层厚度进行了设计<sup>[17-18]</sup>，并尝试在聚合物模板上镀铜、金、陶瓷以及其他高分子物<sup>[19]</sup>以得到多种材料的空心微点阵材料。又通过控制上述合成条件制备了非晶态的镍磷空心微点阵材料<sup>[20]</sup>，并利用数值模拟设计了含有填充纳米多孔材料功能化（NMF）液体的金属空心微点阵材料<sup>[21]</sup>和四面体结构的空心微点阵材料<sup>[22]</sup>。在此基础上，通过电沉积的方法将纳米Al-Mn合金层沉积在镍磷空心微点阵结构上<sup>[23]</sup>，以及通过包渗透的方法制备了镍基高温合金的空心微点阵材料<sup>[24]</sup>，进一步将材料种类进行了推广，并尝试制作了多层的复合金属材料的微点阵结构<sup>[25]</sup>。另外，他们还将该制备手段运用到了大型薄壁件的制作中，成功制作出了薄壁的火箭发动机的推进器结构<sup>[26]</sup>。

美国LLNL实验室的Xiaoyu Zheng等人<sup>[27]</sup>运用微立体光刻技术制作了以FCC（面心立方）结构为单元格的聚合物微点阵模板，并同样使用化学镀方法制作了金属镀层，再通过热分解的方法得到了金属空心微点阵材料。制备方法与材料结构如图4所示。

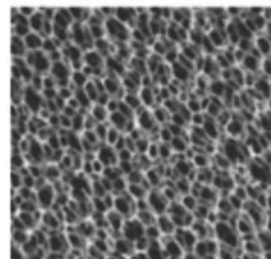
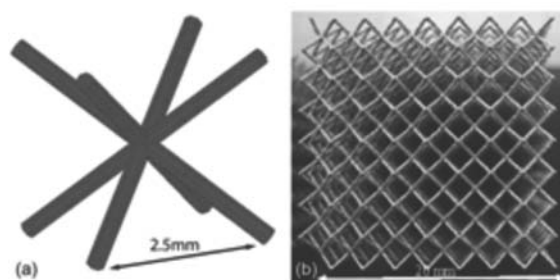


图1 泡沫铝的典型结构特征

Fig. 1 Typical structural characteristics of aluminum foam



(a) 实心单元格 (b) 宏观结构20 mm × 20 mm × 20 mm

图2 BCC结构

Fig. 2 BCC structure

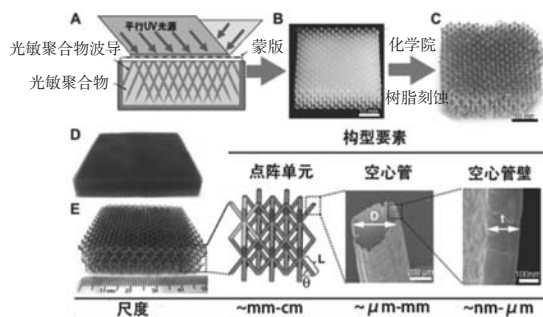


图3 超轻镍基金属微点阵材料的制备方法与材料结构

Fig. 3 Preparation method and material structure of ultralight Ni-based microlattice materials

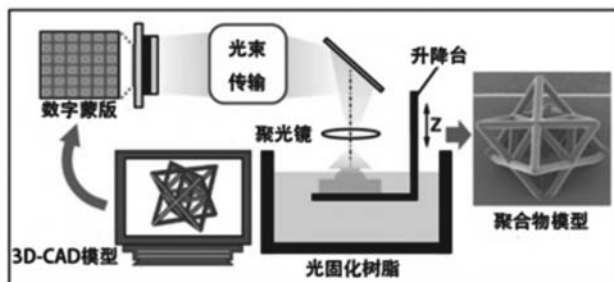


图4 微立体光刻制备FCC结构聚合物模板

Fig. 4 Preparation of FCC polymer templates by microstereoscopic lithography

加拿大西安大略大学的Yang Jun等人使用i3DP技术制作了以六面体<sup>[28]</sup>及FCC结构<sup>[29]</sup>为单元格的微点阵模板(图5),同样利用化学镀的方法制备金属镀层,最后用化学刻蚀的方法去除聚合物模板,从而得到金属空心微点阵材料。

国内对此的研究比较少,四川大学的Jianjun Bao等人<sup>[30]</sup>以三聚氰胺泡沫为模板通过化学镀银的方法获得泡沫银;天津大学的姜斌<sup>[31-33]</sup>利用银镜反应在日用清洁泡沫(三聚氰胺泡沫)上制备银薄层,并在此基础上以无钯活化化学镀的方法制作了银、镍、钴、铜等多种超轻泡沫金属宏观结构,如图6所示。

北京航空航天大学的Yang Qinglin等人用3D打印的方法直接制备了金刚石结构的微点阵模板,并用化学镀方法对表面施镀Ni-P<sup>[34]</sup>和Ni-P-金刚石微粒<sup>[35]</sup>,最终获得了超轻质结构金属微点阵材料,如图7所示。

先进材料制备技术的发展为结构材料轻质化提供了更多的发展空间,国内外材料研究者们对超轻质结构金属材料的研究抱有极大的热情和期待。表1为常见的超轻质微点阵结构材料的结构和制备方法。表2为国内外对于金属微点阵材料的研究现况。

例如:熔融沉积成形技术是以丝状的PLA、ABS等热塑性材料为原料,经高温熔化成液态,然后通过喷嘴挤压出许多很小的球状颗粒,这些颗粒在喷出后会立即固化,固化的颗粒在计算机的控制下逐层堆积,在立体空间中进行排列组合,最终形成实物<sup>[36]</sup>。其原理见图8,采用这种方法制备微点阵材料模板,再结合化学镀方法,最后通过热分解方法去除模板制备的超轻材料,其技术成熟度高,成本较低<sup>[37]</sup>,但打印精度低,热塑性模板尺寸较大,热分解过程对镀层破坏较严重。其制备方法为熔融沉积成形技术的发展提供了新的思路。

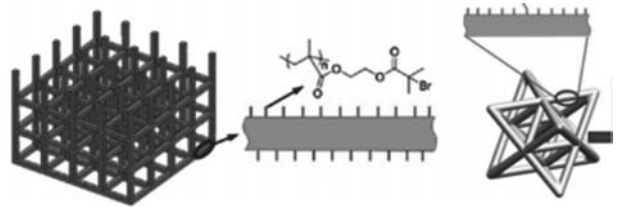
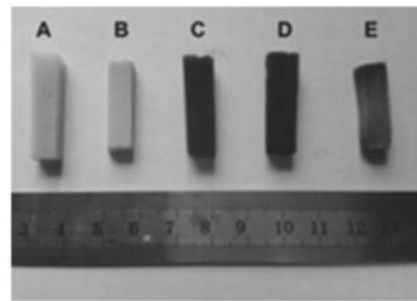
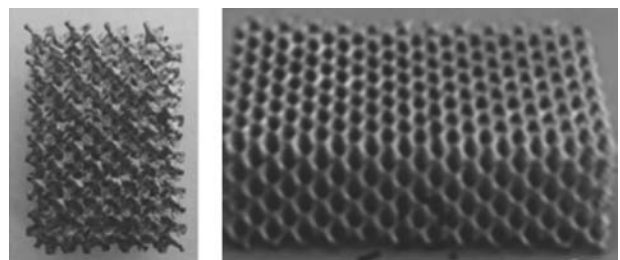


图5 i3DP模板: FCC结构与六面体结构  
Fig. 5 i3DP template: FCC structure and hexahedral structure



(A) 化学镀银后三聚氰胺泡沫; (B) 泡沫银; (C) 泡沫镍;  
(D) 泡沫钴; (E) 泡沫铜

图6 超轻泡沫金属样  
Fig. 6 Ultralight metal foam samples



(a) Ni-P (b) Ni-P-金刚石微粒

图7 金刚石结构微点阵材料

Fig. 7 Diamond structured microlattice materials

表1 常见的超轻质微点阵结构材料的结构和制备方法

Table 1 Common structure and preparation methods of ultralight metal structural materials

制备方法	单元格结构	几何结构	材料种类
熔融沉积成形	3D结构	任意支撑结构	热塑性材料
选择性激光熔化成形	3D结构	任意支撑结构	金属、聚合物材料
电子束熔化成形	3D结构	任意支撑结构	金属材料
立体光刻成形	3D结构	结构角度受限	聚合物材料
搭接拼装成形	3D结构	任意结构	金属、陶瓷、聚合物
金属丝编织成形	3D结构	任意结构	金属、聚合物材料
冲压/挤压成形	3D结构	点阵中心受限	金属、聚合物材料
光敏聚合物波导成形	3D结构	点阵扩展受限	光敏聚合物材料
投影微立体光刻成形	3D结构	任意结构	光敏聚合物材料
电泳沉积	准3D结构	准平面结构受限	金属、陶瓷、聚合物
浆料直写成形	准3D结构	任意支撑结构	金属、陶瓷、聚合物

选择性激光熔化成形技术是激光快速成形制造领域中最具发展潜力的技术之一，该技术可以追溯到20世纪80年代，将3D模型切片后，在充满待烧结的材料粉末的容器内，采用高功率密度的激光束从最底层的3D切片开始直接熔化金属粉末；接着平台下移，材料辊在已烧结部分再铺上薄薄的一层材料粉末进行烧结；如此往复，直到整体成形，进而获得具有冶金结合、相对密度接近100%、结构复杂、尺寸精度高的金属零件<sup>[38]</sup>。其原理如图9所示。成形材料的单种金属粉末，主要包括铁基合金、镍基高温合金、钴-铬合金、钛合金、铝合金以及贵金属<sup>[39]</sup>。利用选择性激光熔化技术能够直接打印空心微点阵金属材料，其方法快捷简单，省去了模板打印以及化学镀过程，但由于激光束尺寸的限制以及本身存在着打印粉末球化等问题，其引起的孔隙及裂纹缺陷在超轻质微点阵结构金属材料中更为突显，极大地降低了材料的性能和制备成功率，因此，这种方法一般用来打印实心微点阵材料，这对材料的表观密度存在极大不利影响。因此，改善设备稳定性，提高粉末的综合性能等问题是该技术进一步发展的方向。

立体光刻成形技术，又叫做光固化成形技术，是制备微点阵金属材料最广泛应用的方法。它是利用紫外激光逐层扫描液态的光敏树脂，引发聚合反应，激光会沿着零件预先切片分层扫描截面轮廓，并对液态树脂进行逐点扫描。被扫描到的树脂薄层在聚合反应作用下由点逐渐形成线，最终形成零件的一个薄层的固化截面，而未被扫描到的树脂保持原来的液态。随着该层固化后，平台移动，开始固化下一层，如此往复，直到最终成形<sup>[40]</sup>。其原理如图10所示。因此，对于立体光刻成形技术的研究来说，光敏树脂的研究占据着重要地位。目前主要使用的树脂包括不饱和聚酯（粘度适宜，易固化成形，抗冲击性能及硬度不理想，易收缩），聚酯丙烯酸酯（因光固化速率慢、硬度不高，不能广泛应用），聚氨酯丙烯酸酯（韧性好、耐磨性高，但综合性能不佳，应用规模小），环氧丙烯酸酯（粘结强度大、硬度高、耐化学药品腐蚀性强，应用最广、用量最大）<sup>[41]</sup>。利用立体光刻成形技术制备超轻质材料的方法与熔融沉积成形技术相似，均是与化学镀方法相结合，最后通过去除聚合物模板得到超轻质微点阵结构金属材料。这类方法相较于熔融沉积成形技术，对打印精度有很大的提升，可以制备出尺寸较小的聚合物模板，极大地降低了材料的表观密度。但这种方法的发展依赖于对光敏树脂的研究，选择一种固化速率、粘结强度适宜又易于去除的光敏树脂是未来研究的重要方向。

除此之外，利用自然生物的3D微纳周期结构作

表2 国内外对于金属微点阵材料的研究现状  
Table 2 Research status of metal microlattice materials at home and abroad

国家	机构	成果数目
英国	利物浦大学	5
美国	HRL实验室	23
美国	LLNL实验室	1
加拿大	西安大略大学	2
中国	四川大学	1
中国	天津大学	3
中国	北京航空航天大学	2

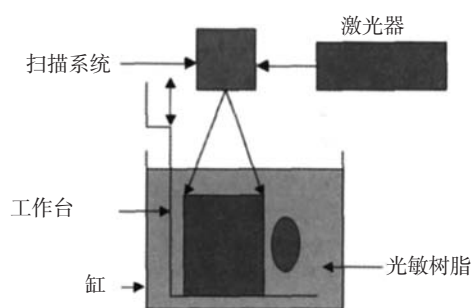


图8 熔融沉积成形技术原理图

Fig. 8 Schematic diagram of fused deposition modeling technology

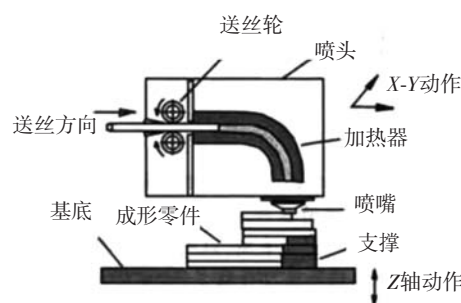


图9 选择性激光熔化技术原理图

Fig. 9 Schematic diagram of selective laser melting technology

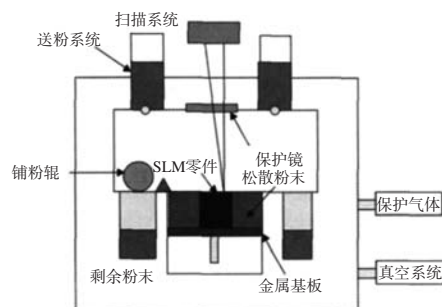


图10 光固化立体造形技术原理图

Fig. 10 Schematic diagram of stereo lithography apparatus technology

为新材料的模版,在保留生物结构的基础上用金属替换部分组元,获得具有生物结构的金属微纳材料也是超轻质微点阵结构金属材料的一大研究方向。目前,上海交通大学<sup>[42-44]</sup>就利用蝶翅鳞片这一自然界中具有百万种不同鳞片结构的自然结构作为模板,采用化学方法,制备出金属基的蝶翅鳞片结构的仿生材料,并利用其遗态特点,研究其与自然蝶翅相类似的光学性能,并希望将其应用于癌细胞荧光成像、电荷分离、太阳能电池等领域。这一制备方法,极大地开阔了超轻质微点阵结构金属材料的设计思路。超轻质微点阵结构金属材料的未来不仅仅可以人为设计点阵结构,还可以利用自然界中千百年进化而来的生物结构,根据仿生思路设计材料结构。

## 2 超轻质微点阵结构金属材料的性能

对于超轻质微点阵结构金属材料来说,其性能主要的关注点是表观密度、抗压性能以及抗冲击性能等。为此,我们将近年来金属微点阵结构材料的研究情况进行了总结(表3)。

表观密度是衡量超轻质金属材料的重要指标,对材料的力学性能有着很大的影响。对于一般的泡沫金属材料来说,其最低表观密度也刚刚能达到 $10 \text{ mg/cm}^3$ 的界限,而制备条件却相当苛刻<sup>[45-46]</sup>。可设计结构的金属点阵材料其表观密度也多数在 $10 \text{ mg/cm}^3$ 之上<sup>[47]</sup>,空心基材的微点阵金属材料的表观密度却能达到 $10 \text{ mg/cm}^3$ 以下,甚至达到 $0.9 \text{ mg/cm}^3$ <sup>[11]</sup>。可想而知,空心基材

对于表观密度的降低做出了相当大的贡献。孔隙度也是一项必须考察的材料指标,其对材料的力学性能也有着很大的影响。随着孔隙度的增加,材料的力学性能与能量吸收能力会下降,但能量吸收效率会升高。对于上述的材料来说,孔隙度均能被设计。

多孔材料的抗压能力是首先需要测试的性能,压缩应力和应变是反映材料抗压能力的两个重要指标。对于这类材料来说,压缩曲线一般有两种<sup>[48]</sup>:一种是典型的韧性金属压缩性能曲线,一种是脆性金属压缩性能曲线。压缩性能曲线主要有三个阶段:弹性变形区、压缩平台区和致密区,如图11所示。

金属泡沫的压缩强度能达到 $10 \text{ MPa}$ 以上,并且会随着孔隙度的增加有所降低,但压缩平台只能够在不超过50%的应变内保持不变<sup>[49-50]</sup>。金属微点阵材料的压缩强度并不很高,与其表观密度成正比,一般只有 $1\sim 20 \text{ kPa}$ ,但其压缩平台能够维持在50%应变以上,并且随着表观密度的降低而增加<sup>[51]</sup>。此外,金属微点阵材料还有着优良的回复能力,能够在超过50%以上的压缩下回复到初始状态<sup>[1]</sup>。

断裂分析是力学性能研究的重要部分,对提高材料质量、改进制备方法等方面具有重要的意义。无论是泡沫金属材料还是金属微点阵材料,其抗压测试的断裂无外乎韧性断裂和脆性断裂两种。对于泡沫金属来说,影响其断裂情况的原因一般是材料的本身以及环境温度,比如纯铝泡沫以弯曲为主,铝合金泡沫会出现局部断裂<sup>[51]</sup>;室温下锌铝泡沫的断裂方式是撕裂

表3 金属微点阵结构材料的性能汇总表  
Table 3 Performance summary of metal microlattice structural materials

材料类型	表观密度 $\rho / (\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	抗压强度 $\sigma_{bc}/\text{MPa}$	压缩平台/%	断裂性质	能量吸收效率 $\eta / \%$	
实心微晶格	BCC结构: Ti-6Al-4V <sup>[66-67]</sup>	4.43~	5~10	~62	脆性断裂	50~70
	BCC结构: Al <sup>[50]</sup>	0.178~	2.12	~72	-	~55
	BCC结构: 不锈钢 <sup>[68-70]</sup>	2.16~	0.2~8	50~80	韧性断裂	50~
空心微晶格	BCC结构: Ni-P <sup>[17-18,52-53]</sup>	0.001~	0.000 027~12	~50	脆/韧性断裂	54~
	BCC结构: Cu <sup>[19]</sup>	8.9~	0.000 1~0.001	-	-	-
	BCC结构: Au <sup>[19]</sup>	19.3~	0.001	-	-	-
	BCC结构: 非晶态Ni-P <sup>[20]</sup>	0.008~	0.000 2~0.02	-	脆/韧性断裂	-
	BCC结构: NMF液体填充 <sup>[21]</sup>	-	0.6	~60	-	~80
	FCC结构: Ni-P <sup>[29]</sup>	0.040 3~	0.002 5~0.05	~50	-	~80
	六面体结构: Cu <sup>[28]</sup>	0.007 2~	-	~50	-	-
	四面体-sandwich结构: Ni-P <sup>[22]</sup>	0.029~	1.3~4.3	-	-	-
	四面体-sandwich结构: Al-Mn <sup>[23]</sup>	0.01~	0.3~1	-	脆性断裂	-
	金刚石结构: Ni-P <sup>[34]</sup>	0.038~	0.019~0.04	~75	-	~70
	金刚石结构: Ni-P-金刚石 <sup>[35]</sup>	0.235~	0.1~1.75	~40	-	~50
超轻泡沫: Al <sup>[31]</sup>	0.018 7~	0.001~0.01	~80	-	~90	
超轻泡沫: Ni/Al/Ni三层 <sup>[33]</sup>	0.007 4~	0.001~0.004	~82	-	~98	
超轻泡沫: Co/Al双层 <sup>[32]</sup>	0.012 7~	0.001~0.002	~87	-	~90	

或断裂,而200 °C时却只是发生弯曲<sup>[49]</sup>。对于金属微点阵材料来说,断裂方式除了受温度影响以外还会受镀层材料以及镀层厚度的影响,比如500 nm厚镀层的微点阵材料表现出脆性断裂,而150 nm厚镀层的微点阵材料却是发生连续变化的坍塌<sup>[52]</sup>。

能量吸收性能是超轻质金属材料的一大特色性能,它是由该材料的多孔结构所带来的性能。泡沫金属的能量吸收效率仅有30%左右,而金属微晶格材料的能量吸收效率却在50%以上<sup>[53]</sup>,甚至达到90%以上。能量吸收可通过压缩曲线来判断,如图12所示。

经分析,对空心微点阵材料来说,杨氏模量 $E$ 与密度 $\rho$ 成抛物线关系,这与多孔泡沫相似都是由弯曲为主导的力学行为,因此,其比例关系可以总结为:

$$\frac{E}{E_s} \approx C \left( \frac{\rho}{\rho_s} \right)^2 \quad (1)$$

式中: $E_s$ 与 $\rho_s$ 分别为固体组元材料的杨氏模量和密度, $C$ 为弯曲主导结构的载荷传递效率。以镍基材料为例,其 $C$ 值为3.3,远远大于多孔泡沫的 $C$ 值1。

这一发现表明,与多孔泡沫中发现的固体支柱的抗弯性能相比,空心微点阵具有更好的抗弯性能。而对于弯曲主导的多孔泡沫其失效形式一般以屈服失效为主,其断裂强度 $\sigma_{pl}$ 与密度 $\rho$ 关系可表示为:

$$\frac{\sigma_{pl}}{\sigma_{y,s}} \approx 0.3 \left( \frac{\rho}{\rho_s} \right)^{1.5} \quad (2)$$

式中: $\sigma_{y,s}$ 为固体组元材料的屈服强度。

空心微点阵的失效形式表现出不一样的情况,存在着弹性屈曲与屈服的过渡过程,以镍基材料为例,这种过渡过程发生在密度为0.023 g/cm<sup>3</sup>处。但是不同结构与材质的过渡过程密度却不同,这是由于空心节点的局部变形不一致造成的。根据实验结果,空心微点阵的变形以节点的局部弹性屈曲和脆性断裂为主,因此空心微点阵材料实际结果要低于上式的预测结果<sup>[19]</sup>。

而高应变可恢复性存在于碳纳米管簇和聚合物泡沫中,同样也会存在于空心微点阵材料中。但在较高的相对密度下,这种可恢复性会在空心微点阵材料中消失,并能观察到典型的金属泡沫材料的塑性变形或典型的陶瓷泡沫材料的脆性断裂。因此,建立了可恢复弹性变形与不可恢复塑性变形之间过渡时壁厚 $t$ 与支柱直径 $D$ 之比的预测模型。模型假设微点阵在大应变下通过旋转的杆薄韧带邻近的节点,产生弯折(局部屈曲)或部分节点断裂。随着韧带厚度与杆壁厚接近(100 nm ~ 50 μm),在不引入塑性应变的情况下,旋转是会发生的。因此,塑性变形开始时的临界壁厚可表示为式(3)。

$$\left( \frac{t}{D} \right)_{cr} = \frac{\sigma_{y,s}}{E_s} \frac{0.25}{\theta - \sin^{-1}[(1 - \varepsilon_{max}) \sin \theta]} \quad (3)$$

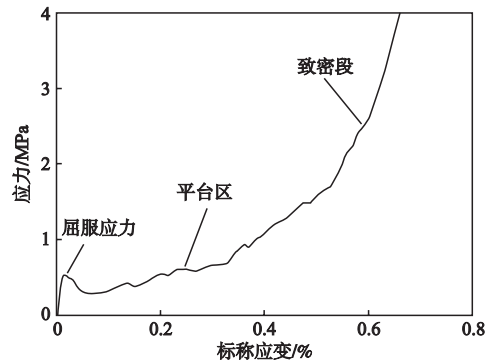


图11 超轻质金属材料的典型应力应变曲线

Fig. 11 Typical stress-strain curve of ultralight metal materials

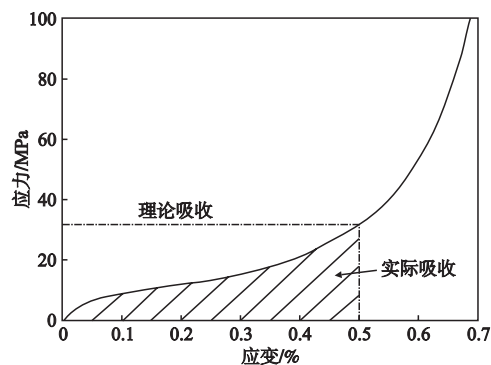


图12 理想能量吸收和实际能量吸收示意图

Fig. 12 Schematic diagram of ideal energy absorption and actual energy absorption

式中: $\varepsilon_{max}$ 为微点阵最大全局应变的经验值, $\theta$ 是桁架角的弧度。

由上式可以准确地预测 $(t/D)_{cr}$ 对于两种变形机制的影响,表明虽然组成材料不同,但微点阵材料的结构在荷载响应中起主导作用<sup>[19]</sup>。

此外,目前正在开发基于空心节点几何精确模型的有限元计算方法来进一步精确计算材料性能;同时,这些计算将有助于阐明由多种材料制成的薄壁空心点阵的具体变形机理。然而,用于计算多孔材料的先验近似方程会错误地计算空心点阵的重叠体积和相关表面积。这是由于该模型探索的重点是多孔材料的物理性质,其采用几何模型作为输入,因此物理模型的精度取决于几何模型的精度。然而,典型的多孔材料几何模型简化了近似,从而在计算空心点阵时引入误差,特别是在高固体体积分数时。点阵材料的一个共同特征是相贯圆柱体,其相贯体积称为斯坦梅茨体。对于直角相交的两个圆柱体,斯坦梅茨体由两个基对基的正方形锥体组成,锥体呈非线性锥形。其解已扩展到多个圆柱体中,但这些解只适用于非常特定的固体圆柱体方向。因此,J. Ro Christopher等人<sup>[54]</sup>建立了基于矩形和六角形单元以及实心 and 空心支柱等结构的具有圆截面杆的点阵材料的固体体积分数和致密性

的闭式解析方程。以较简单的正方形单元空心点阵为例,其体积分数 $\bar{\rho}$ 见式(4),其致密度 $\beta_s$ 见式(5)。

$$\bar{\rho}_{s,\text{hollow}} = \frac{\frac{8t}{3D}[-2(1+\sqrt{1+\csc^2\theta})(3+6(\frac{t}{D})+4(\frac{t}{D})^2)+3\pi\frac{L}{D}(1+\frac{t}{D})]}{(\frac{L}{D})^3\sin\theta} \quad (4)$$

$$\beta_s = \frac{8(-2+\frac{L}{D}\pi-2\sqrt{1+\csc^2\theta})}{D(\frac{L}{D})^3\sin\theta} \quad (5)$$

基于以上,超轻质微点阵结构金属材料在表观密度、比表面积、压缩性能及吸能恢复性能的发展,都将围绕表观密度的变化而发展。因此,进一步提高材料的表观密度是重中之重。

表观密度是实际质量与表观体积的比值,那么提高表观密度就应当从这两方面入手。选择自身密度较低的金属材料是在体积不变情况下降低实际质量的一种办法。目前选择的镍基合金是因为利用化学镀方法制备简单,成功率高。采用气相沉积等制备更轻质的合金层是未来需要考虑的方法。

除此之外,在表观体积不变的情况下,优化内部结构,降低所用材料的比例也是一种降低实际质量的方法。同时,根据式(3)可以知道,材料结构在微点阵材料力学性能等方面起到主要作用,将决定微点阵材料的包括抗压强度、能量吸收、换热吸音等多种性能。因此,根据所要优化的性能,就需要对结构进行针对性的改变。早先对结构的设计主要根据经验式与半经验式的反复的实物与模拟试制、试验、修改,以试验的方式来进行结构的设计优化。这明显不利于超轻质微点阵结构金属材料的开发设计,因此,将拓扑优化引入到超轻质微点阵结构金属材料的结构与性能设计中是未来研究的重点。拓扑优化是在可设计域内,根据选定的密度条件与性能条件,依照数值均匀化与能量均匀化方法设计出具有理想性能的结构模型。而沿着优化准则法发展,基于变密度法、交换单元法、拓扑灵敏度、应力惩罚等对其的修正,使拓扑优化的结构边界更加清晰,结构设计更加合理,运算速度更加快速,并开始能够直接优化设计出三明治结构以及机翼结构等三维结构。目前对于此种方法的研究,已经脱离传统计算模拟对模型的改善,而是针对密度和性能等直接设计,计算更加精确,为结构优化提供了更有利的条件,为超轻质微点阵结构金属材料的性能设计提供充分的理论基础<sup>[55-60]</sup>。

### 3 超轻质微点阵结构金属材料的应用

多孔金属材料已有或者潜在的应用领域主要包括过滤与分离、催化剂载体、电极材料、吸音材料、

电磁屏蔽、能量吸收、换热元件和冷却材料等领域。其中,应用最广泛的就是过滤与分离、催化剂载体以及吸能换热等。把多孔金属材料加工成一定的形状,就可以用作过滤介质,从废水、溶液、石油甚至气体等流体中过滤出悬浮物或固体杂质等。而在化学反应中,催化效果很大程度上取决于催化剂和反应物接触面积的大小,金属多孔材料有着大的比表面,且有较高的强度、韧性和导热性能,可代替传统材料用作催化剂载体,其作为载体可使催化剂的有效接触面积增加,大幅提高催化效率。同样,多孔金属材料也是一种具有低、常压应力下高能量吸收特性的轻质高阻尼及能量吸收,优良的热物理性能的材料,适合制作轻质、耐高温、阻燃的能量(如冲击能量)吸收器以及强化传热和微电子冷却的换热器等<sup>[61-65]</sup>。

尽管超轻质多孔金属材料的研究才刚刚开始,其制备方法与工艺还处在起步阶段,但随着对其性能的不断开发,其应用同样备受关注。参照多孔金属材料的应用领域,超轻质多孔金属材料由于其更为优异的压缩性能、能量吸收能力以及超低表观密度、超高比表面积,理应在过滤与分离、催化剂载体以及吸能换热等领域有着更加突出的应用效果。

对于广泛应用于航空航天行业的轻质夹层板来说,通过将薄而硬的面板附着在较厚、重量较轻的芯材的顶部和底部表面,利用有结构的多孔材料承受载荷的同时将面板作为附加到向外的表面。在夹层结构中,面板承受平面和弯曲载荷,而核心承受横向剪切和横向压缩载荷。现有的夹层材料一般为铝合金、玻璃纤维增强聚合物等,最常采用的结构一般是四面体和锥体桁架结构。随着对结构和性能要求的不断提高,轻质结构材料的复杂性要求不断增加。因此与传统夹层材料夹芯相比,通过设计具有与局部负载相匹配的特定区域表观密度的微点阵结构可以实现表观密度的大幅降低。这对于汽车和航空航天等高度重视尺寸和重量降低的行业具有广泛的适用性。

超轻质材料的超高比表面积也为散热提供了足够的条件,因此,将其运用于热交换的器件是不错的选择,如图13所示<sup>[71]</sup>。对于散热来说冷却、导热和热交换部分是必不可少的,其中高性能的冷却有着至关重要的作用。设计制备的微点阵材料不仅有足够的散热面积,更具有其他的优良性能,当同时优化多个性能目标时,比如最大的传热率、最小的外部能量输入和最小的质量时,超轻结构金属材料将会是最佳的选择。与传统材料相比,它可以通过设计不同的结构来获得需要的性能,同时实现部件表观密度的大幅度下降,从而可以满足更多的轻量化结构的需求,这种微点阵换热器的结构和吸能性能的应用代表了一种新型的多功能设计。

此外,从安全头盔到车辆抗冲击外壳,再到我们身边的运动防护设备,吸能材料在保护机体免受冲击方面同样具有广泛的应用价值。空间限制和质量轻的要求通常需要具备兼顾表观密度和最大能量吸收的吸能材料,而微点阵材料的超轻化和高的能量吸收效率恰恰能够满足这个需求<sup>[22]</sup>。因此,微点阵材料是作为保护介质的不二选择<sup>[72]</sup>。随着对吸能学科的深入理解,将寻求更复杂的保护材料来处理复杂的损伤标准。在数值模拟的指导下,进一步优化单元结构,将产生下一代的能量吸收和保护材料<sup>[73-74]</sup>。除上述应用外,吸能材料还可用于吸声和减振。这是微点阵材料可能产生重大影响的另一个领域。

同样的,通过制作具有生物兼容性的镀层,微点阵材料同样在生物支架等方面有着很大应用前景<sup>[75]</sup>。而微点阵材料具有的独特压缩特性等还有着更多的讨论意义和应用探索值得我们研究<sup>[76]</sup>。

## 4 结论与展望

超轻质微点阵结构金属材料作为一种新型的结构材料,不仅有着超低的表观密度,而且有着独特的比强度、比表面积,对材料的更新换代有着重大的意义。随着增材制造技术的发展,其将不断推进金属微点阵材料领域研究的发展。本文回顾了近年来超轻质微点阵结构金属材料领域的研究现状,随着新制备方法的出现和成熟,制作成本的不断下降,制造复杂单元结构的可能性越来越大。这些发展都将促进超轻质微点阵结构金属材料在航空航天、汽车以及医疗等诸多行业的过滤与分离、催化剂载体、电极材料、吸音材料、电磁屏蔽、能量吸收、换热元件和冷却材料等领域的应用。新的结构优化技术将与不断提高的计算能力相结合,也会有助于实现多个目标的多尺度微点

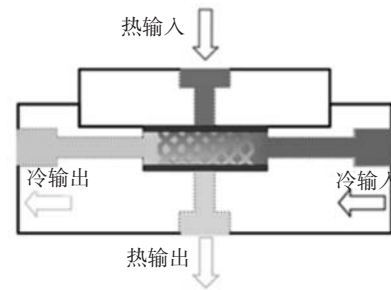


图13 换热器示意图

Fig. 13 Schematic diagram of heat exchanger

阵结构的设计。因此,微点阵结构材料领域有望在未来取得更大的突破。

根据以上分析,我们认为今后可以在以下几个方面取得突破和进展:

(1) 从超轻质微点阵结构金属材料的材质本身出发,通过控制晶粒的生长状况,获得单晶材料,非晶材料或是多晶材料以及通过对金属材料的合金化,制备出多元合金甚至高熵合金。

(2) 从超轻质微点阵结构金属材料的结构上出发,发展新型的微点阵结构以及双层或者多层结构变化的微点阵结构、梯度多层微点阵结构乃至仿生结构等新型结构形式,或者通过计算模拟手段,优化微点阵材料的结构,突出其某一力学性能。

(3) 超轻质微点阵结构金属材料的制备方法依然是在研发阶段,需要更多更方便的制备方法以提高材料的制备效率和降低生产成本,减少材料制备的局限性,并且有待于开发新的基体材料。

(4) 超轻质微点阵结构金属材料的性能依然只是处于初步研究当中,传热、抗振动、抗冲击、吸能、缺陷敏感性等问题的研究依旧需要进一步的探索,其独特性能依然有待于开发与应用。

### 参考文献:

- [1] SCHAEGLER T A, JACOBSEN A J, TORRENTS A, et al. Ultralight metallic microlattices [J]. SCIENCE, 2011, 334 ( 6058 ): 962-965.
- [2] BENJAMIN S. Process for making foamlike mass of metal: US2434775 [P]. 1948-01-20.
- [3] 张士卫. 泡沫金属的研究与应用进展 [J]. 粉末冶金技术, 2016, 34 ( 3 ): 222-227.
- [4] 许庆彦, 熊守美. 多孔金属的制备工艺方法综述 [J]. 铸造, 2005, 54 ( 9 ): 840-843.
- [5] 田庆华, 李钧, 郭学益. 金属泡沫材料的制备及应用 [J]. 电源技术, 2008, 32 ( 6 ): 417-420.
- [6] WANG B, WU L, MA L, et al. Mechanical behavior of the sandwich structures with carbon fiber-reinforced pyramidal lattice truss core [J]. Materials & Design, 2010, 31 ( 5 ): 2659-2663.
- [7] DESHPANDE V S, FLECK N A, ASHBY M F. Effective properties of the octet-truss lattice material [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2001, 49 ( 8 ): 1747-1769.
- [8] WANG J, EVANS A G, DHARMAJENSEN K, et al. On the performance of truss panels with Kagomé cores [J]. International Journal of Solids & Structures, 2003, 40 ( 25 ): 6981-6988.
- [9] 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 ( 14 ): 4229-4237.
- [10] WADLEY H N G. Multifunctional periodic cellular metals [J]. Philosophical Transactions of The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences, 2006, 364 ( 1838 ): 31-68.
- [11] QUEHEILLANT D T, MURTY Y, WADLEY H N G. Mechanical properties of an extruded pyramidal lattice truss sandwich structure [J]. Scripta Materialia, 2008, 58 ( 1 ): 76-79.
- [12] LEE Y H, LEE B K, JEON I, et al. Wire-woven bulk Kagome truss cores [J]. Acta Materialia, 2007, 55 ( 18 ): 6084-6094.



- [13] HASAN R, MINES R, FOX P. Characterization of selectively laser melted Ti-6Al-4V micro-lattice struts [J]. *Procedia Engineering*, 2011, 10 (7): 536-541.
- [14] Gümrük R, MINES R A W. Compressive behaviour of stainless steel micro-lattice structures [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2013, 68: 125-139.
- [15] MINES R A W, TSOPANOS S, SHEN Y, et al. Drop weight impact behaviour of sandwich panels with metallic micro lattice cores [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2013, 60 (Complete): 120-132.
- [16] Gümrük R, USUN A, MINES R. Enhancement of the mechanical performance of stainless steel micro lattice structures using electroless plated nickel coatings [C] // *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings*, 2018, 2 (8): 494.
- [17] TORRENT A, SCHAEGLER T A, JACOBSEN A J, et al. Characterization of nickel-based microlattice materials with structural hierarchy from the nanometer to the millimeter scale [J]. *Acta Materialia*, 2012, 60 (8): 3511-3523.
- [18] VALDEVIT L, GODFREY S W, SCHAEGLER T A, et al. Compressive strength of hollow microlattices: Experimental characterization, modeling, and optimal design [J]. *Journal of Materials Research*, 2013, 28 (17): 2461-2473.
- [19] MALONEY K J, ROPER C S, JACOBSEN A J, et al. Microlattices as architected thin films: Analysis of mechanical properties and high strain elastic recovery [J]. *APL Materials*, 2013, 1 (2): 022106.
- [20] RYS J, VALDEVIT L, SCHAEGLER T A, et al. Fabrication and deformation of metallic glass micro-lattices [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2014, 16 (7): 889-896.
- [21] LIU Y, SCHAEGLER T A, JACOBSEN A J, et al. Quasi-static crush behavior of hollow microtruss filled with NMF liquid [J]. *Composite Structures*, 2014, 115: 29-40.
- [22] CLOUGH E C, ENSBERG J, ECKEL Z C, et al. Mechanical performance of hollow tetrahedral truss cores [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2016, 91: 115-126.
- [23] SCHAEGLER T A, CHAN L J, CLOUGH E C, et al. Nanocrystalline aluminum truss cores for lightweight sandwich structures [J]. *JOM*, 2017, 69 (12): 2626-2634.
- [24] ERDENIZ D, SCHAEGLER T A, DUNAND D C. Deposition-based synthesis of nickel-based superalloy microlattices [J]. *Scripta Materialia*, 2017, 138: 28-31.
- [25] SALARI-SHARIF L, SCHAEGLER T A, VALDEVIT L. Hybrid hollow microlattices with unique combination of stiffness and damping [J]. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 2018, 140 (3): 031003.
- [26] MARTIN J H, ASHBY D S, SCHAEGLER T A. Thin-walled high temperature alloy structures fabricated from additively manufactured polymer templates [J]. *Materials & Design*, 2017, 120 (Complete): 291-297.
- [27] ZHENG X, LEE H, WEISGRABER T H, et al. Ultralight, ultrastiff mechanical metamaterials [J]. *Science*, 2014, 344 (6190): 1373-1377.
- [28] WANG X, GUO Q, CAI X, et al. Initiator-integrated 3D printing enables the formation of complex metallic architectures [J]. *ACS applied materials & interfaces*, 2013, 6 (4): 2583-2587.
- [29] ZHANG D, XIAO J, MOORLAG C, et al. Development of ultralight, super-elastic, hierarchical metallic meta-structures with i3DP technology [J]. *Nanotechnology*, 2017, 28 (45): 455708.
- [30] XU Y, LI Y, XU W, et al. An ultra-light and high electromagnetic shielding effectiveness material based on melamine foam with its skeleton metallized [J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2015, 26 (2): 1159-1171.
- [31] 姜斌. 超轻泡沫金属的简易高效制备及其性能研究 [D]. 天津: 天津大学, 2016.
- [32] JIANG B, YANG X, NIU W, et al. Ultralight Co/Ag composite foams: Synthesis, morphology and compressive property [J]. *Scripta Materialia*, 2016, 117: 68-72.
- [33] JIANG B, HE C N, ZHAO N Q, et al. Ultralight metal foams [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 13825.
- [34] XU J, GAO Y, HUANG H, et al. Diamond-structured hollow-tube lattice Ni materials via 3D printing [J]. *Science China Chemistry*, 2016, 59 (12): 1632-1637.
- [35] FAN Q, GAO Y, ZHAO Y, et al. Fabrication of diamond-structured composite materials with Ni-P-diamond particles by electroless plating [J]. *Materials Letters*, 2018, 215: 242-245.
- [36] OMAR A M, SYED H M, JAHAR L B. Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects [J]. *Advances in Manufacturing*, 2015, 3 (1): 42-53.
- [37] 黄子帆, 马跃龙, 李俊美, 等. 熔融沉积成型彩色3D打印机的研究 [J]. *机床与液压*, 2017, 45 (4): 21-25.
- [38] 周钢, 蔡道生, 史玉升, 等. 金属粉末熔化快速成型技术的研究进展 [J]. *航空制造技术*, 2009 (3): 43-46.
- [39] CALADO L M, TARYBA M G, CARMEZIM M J, et al. Self-healing ceria-modified coating for corrosion protection of AZ31 magnesium alloy [J]. *Corrosion Science*, 2018: 020013.
- [40] 王广春, 袁圆, 刘东旭. 光固化快速成型技术的应用及其进展 [J]. *航空制造技术*, 2011 (6): 26-29.
- [41] 张恒, 许磊, 胡振华, 等. 光固化3D打印用光敏树脂的研究进展 [J]. *合成树脂及塑料*, 2015, 32 (4): 81-84.
- [42] 陈羽. 具有蝶翅单鳞片结构材料的制备及光学性能研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
- [43] 谭勇文. 仿蝶翅微纳结构金属功能材料的制备及光响应特性研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [44] 赵华梅, 顾佳俊, 刘庆雷, 等. 蝶翅为模板制备三维分级微纳光学材料 [J]. *中国材料进展*, 2017 (7): 557-565.
- [45] VERDOOREN A, CHAN H M, GRENESTEDT J L, et al. Fabrication of low-density ferrous metallic foams by reduction of chemically bonded ceramic foams [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2006, 89 (10): 3101-3106.
- [46] TAPPAN B C, HUYNH M H, HISKEY M A, et al. Ultralow-density nanostructured metal foams: combustion synthesis, morphology, and composition [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2006, 128 (20): 6589-6594.
- [47] 吴林志, 熊健, 马力, 等. 新型复合材料点阵结构的研究进展 [J]. *力学进展*, 2012, 42 (1): 41-67.
- [48] RUAN D, LU G, CHEN F L, et al. Compressive behaviour of aluminium foams at low and medium strain rates [J]. *Composite structures*, 2002, 57 (1-4): 331-336.
- [49] 瞿庆祥. 开孔锌铝合金泡沫的性能研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- [50] 郭权芬. 泡沫镁合金的制备及其性能研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2018.

- [51] 王斌, 何德坪. 泡沫Al合金的压缩性能及其能量吸收 [J]. 金属学报, 2000, 36 (10): 1037-1040.
- [52] LIAN J, JANG D, VALDEVIT L, et al. Catastrophic vs gradual collapse of thin-walled nanocrystalline Ni hollow cylinders as building blocks of microlattice structures [J]. Nano letters, 2011, 11 (10): 4118-4125.
- [53] SCHAEGLER T A, RO C J, SORENSSEN A E, et al. Designing metallic microlattices for energy absorber applications [J]. Advanced Engineering Materials, 2014, 16 (3): 276-283.
- [54] RO C J, ROPER C S. Analytical models of the geometric properties of solid and hollow architected lattice cellular materials [J]. Journal of Materials Research, 2018, 33 (3): 264-273.
- [55] 李好. 基于变密度法的连续体结构拓扑优化方法研究 [D]. 湖北: 华中科技大学, 2011.
- [56] 庄荣宇. 面向增材制造的自支撑结构多尺度拓扑优化方法研究 [D]. 湖北: 华中科技大学, 2011.
- [57] 李喆. 基于交换单元法的连续体结构拓扑优化方法研究 [D]. 湖北: 华中科技大学, 2011.
- [58] 基于应力惩罚的结构拓扑优化方法研究 [D]. 湖北: 华中科技大学, 2018.
- [59] AAGE N, ANDREASSEN E, LAZAROV B S, et al. Giga-voxel computational morphogenesis for structural design [J]. Nature, 2017, 550 (7674): 84-86.
- [60] FU J, LI H, GAO L, et al. Design of shell-infill structures by a multiscale level set topology optimization method [J]. Computers & Structures, 2019, 212: 162-172.
- [61] 周伟. 多孔金属纤维烧结板制造及在制氢微反应器中的作用机理 [D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- [62] 付全荣, 张钦鋈, 段滋华, 等. 多孔泡沫金属及其在化工设备中的应用 [J]. 化工机械, 2010, 37 (6): 805-810.
- [63] 李淑平. 金属多孔材料高温气体过滤除尘过程的研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2004.
- [64] 闫秀玲. 纳米多孔金属在电催化及生物催化方面的应用 [D]. 济南: 山东大学, 2011.
- [65] 李东峰. 钛纤维多孔材料传热及高温吸声性能研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016.
- [66] WANG Z, LI P. Characterisation and constitutive model of tensile properties of selective laser melted Ti-6Al-4V struts for microlattice structures [J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 725: 350-358.
- [67] HASAN R, MINES R A W, SHEN E, et al. Comparison of the drop weight impact performance of sandwich panels with aluminium honeycomb and titanium alloy micro lattice cores [C] // Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications, 2010, 24: 413-418.
- [68] USHIJIMA K, CANTWELL W J, MINES R A W, et al. An investigation into the compressive properties of stainless steel micro-lattice structures [J]. Journal of Sandwich Structures & Materials, 2011, 13 (3): 303-329.
- [69] LI P. Constitutive and failure behaviour in selective laser melted stainless steel for microlattice structures [J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 622: 114-120.
- [70] TANCOGNE-DEJEAN T, SPIERINGS A B, MOHR D. Additively-manufactured metallic micro-lattice materials for high specific energy absorption under static and dynamic loading [J]. Acta Materialia, 2016, 116: 14-28.
- [71] MALONEY K J, FINK K D, SCHAEGLER T A, et al. Multifunctional heat exchangers derived from three-dimensional micro-lattice structures [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012, 55 (9-10): 2486-2493.
- [72] LIU Y, SCHAEGLER T A, CHEN X. Dynamic energy absorption characteristics of hollow microlattice structures [J]. Mechanics of Materials, 2014, 77: 1-13.
- [73] EVANS A G, HE M Y, Deshpande V S, et al. Concepts for enhanced energy absorption using hollow micro-lattices [J]. International Journal of Impact Engineering, 2010, 37 (9): 947-959.
- [74] LI M Z, Günter S, KANG K J. New cellular metals with enhanced energy absorption: wire-woven bulk kagome (WBK) -metal hollow sphere (MHS) hybrids [J]. Advanced Engineering Materials, 2011, 13 (1-2): 33-37.
- [75] SCHAEGLER T A, CARTER W B. Architected cellular materials [J]. Annual Review of Materials Research, 2016, 46 (1): 187-210.
- [76] CORRION A L, CLOUGH E, ECKEL Z, et al. Architected microlattice materials by self-propagating waveguide processing [C] // 11th Annual TechConnect World Innovation Conference and Expo, Held Jointly with the 20th Annual Nanotech Conference and Expo, and the 2017 National SBIR/STTR Conference. 2017, 1: 359-362.

---

## Research Progress of Light and Ultralight Porous Metal Materials

DAI Gui-xin, WU Shi-ping

(School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang, China)

### Abstract:

Ultralight porous metal materials are new multifunctional structural materials with the advantages such as low density, high specific strength, high recovery and high absorption. This article presents the research status on the porous structure metal materials of light/ultralight weight, including studies on the structure of the materials, the preparation technology, mechanical properties and application. Especially, the charts of preparation technology and mechanical properties are provided in the present paper. The potential applications of the materials are summarized and the development tendency is pointed out as well.

### Key words:

ultralight; porous; metal; high specific strength; microlattices structure