

# 金属三维点阵结构制备技术研究进展

赵冰<sup>1</sup>, 李志强<sup>1</sup>, 侯红亮<sup>1</sup>, 韩秀全<sup>1</sup>, 廖金华<sup>1</sup>, 谭淳礼<sup>2</sup>, 白秉哲<sup>2</sup>, 白利硕<sup>2</sup>

(1. 北京航空制造工程研究所, 北京 100024)

(2. 北京交通大学, 北京 100081)

**摘要:** 介绍了国内外在金属三维点阵结构制备方法的研究进展, 及不同制备方法的特点, 并进行了对比分析。提出了一种超塑成形/扩散连接工艺 (SPF/DB) 来制备金属三维点阵结构的方法, 这种方法将点阵夹层结构看作三层或多层夹层结构, 采用 SPF/DB 工艺方法在一个热循环中制备了金字塔型、四面体型、X 型等典型的金属三维点阵结构, 验证了工艺的可行性, 为金属三维点阵结构的制备开辟了一条新的技术路径。对比分析了增材制造方法、塑性成形方法、SPF/DB 等制备方法的特点和优点, 对金属点阵结构技术的发展进行了展望。

**关键词:** 金属三维点阵; 制备方法; 超塑成形/扩散连接

中图分类号: V214.9

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2016)08-2189-12

随着航空航天飞行器的飞行速度越来越高, 对飞行器本身及其发动机减重的要求越来越高, 特别是当飞行速度达到或超过 5 马赫时, 在减重的同时集成多功能显得更加重要<sup>[1-3]</sup>。金属三维点阵轻质高强结构正是为满足这种需求而发展起来的, 点阵结构可用于制造高超音速飞行器的蒙皮和发动机组件。金属三维点阵结构作为一种新型轻质高强多功能结构, 只有十几年的发展历史, 在 2000 年左右, 由哈佛大学的 A. G. Evans 教授、剑桥大学的 M. F. Ashby 教授、麻省理工学院的 L. J. Gibson 教授等人首先提出<sup>[4]</sup>, 其结构类似于在建筑中三维空间内的空间网架, 只是尺寸上要小得多, 如图 1 所示。

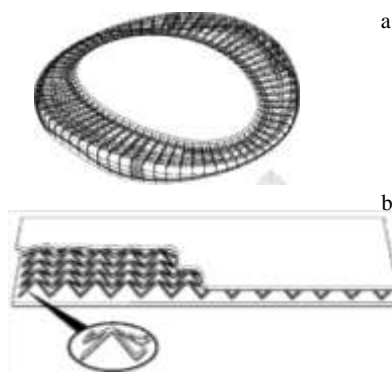


图 1 建筑桁架结构和金属三维点阵结构

Fig.1 Building truss structure and three-dimensional lattice structure of metal: (a) the construction of a three-dimensional lattice structure and (b) a three-dimensional lattice structure of metal<sup>[4]</sup>

与金属泡沫相比较, 金属泡沫的微结构胞壁存在弯曲变形, 而三维点阵夹层结构的胞壁以轴向伸缩变形为主, 后者的结构效率显著高于前者<sup>[5]</sup>。虽然在降噪、隔声等方面, 金属泡沫的效率往往要高于点阵/格栅材料, 但是三维点阵结构为实现多种功能提供了良好的内部空间, 例如散热、布置管线、通液、通气等, 研究表明, 三维点阵结构的散热效率是普通通道散热效率的 7 倍。金属三维点阵本身集成了轻质、高强、多功能的多种特点, 在满足承载要求的同时, 又可以满足多种功能的要求, 实现了结构-功能一体化。因此, 金属三维点阵夹层结构被认为是最有前景的新一代先进轻质超强韧材料, 并已经开始应用于飞行器结构, 有的甚至成为蜂窝的替代结构<sup>[6-8]</sup>。另外, 在医学、汽车、船舶等领域, 点阵结构可以作为吸能、减震、吸波、隐身、生物相容的材料和结构, 具有广泛的用途。

与建筑上的桁架结构相比较, 点阵结构尺寸减小反而增加了制备难度。因此, 寻求兼顾性能、成本、效率的制备方法一直是研究者追寻的目标。在本综述中, 在对金属三维点阵结构制备方法综述和对比分析的基础上, 提出了采用超塑成形/扩散连接工艺 (SPF/DB) 来制备钛合金等难成形金属材料点阵结构的方法, 并对其未来的研究和应用进行了展望。

## 1 三维点阵结构的分类

点阵材料是由节点和连接节点的杆单元组成的周期性材料。点阵结构在拓补连接上类似于开口泡沫材

收稿日期: 2015-08-10

作者简介: 赵冰, 男, 1975 年生, 博士, 研究员, 北京航空制造工程研究所, 北京 100024, 电话: 010-85701254, E-mail: zhao6833@163.com

料,但两者之间有明显的区别。主要体现在:点阵材料每个节点连接的杆单元数必须满足拉伸主导型几何构造要求,而泡沫材料每个节点的连接单元数较少;点阵材料的杆单元为形状规则的直杆,而泡沫材料杆单元形状不规则,截面形状和面积变化大并且屈曲不直;点阵材料胞元规则,严格遵守周期性,而泡沫材料胞元形状、大小变化不一,周期性不严格<sup>[5]</sup>。金属三维点阵结构类型主要有四面体结构、金字塔结构、三维(3D)-Kagome结构以及编织物结构等拓扑结构<sup>[9-11]</sup>,如图2所示。

如图3所示,点阵结构的等效刚度和强度与材料的等效密度近似成线性关系,在相对密度较低时,点阵材料的面内杨氏模量和面外强度比金属泡沫等轻质材料分别高出2个数量级以上和1个数量级以上<sup>[12,13]</sup>。与一般点阵结构相比,利用编织技术制备的编织夹层梁,不存在层间破坏。但由于芯层胞元呈“8”字形或“X”形,是弯曲主导型结构,单独承载能力低,通常与泡沫联合使用作为夹层。也有利用空心金属管有序堆垛形成结构,这种结构不满足点阵结构的特征,只在某一个方向上具有良好的力学性能,适宜作为吸能材料<sup>[14]</sup>。

## 2 制备方法和工艺

经过十几年的发展,金属三维点阵结构已经成为研究的热点,研究者开发了多种制备方法,不同类型点阵结构的制备方法不同,力学性能特点不同,应用对象也不同<sup>[15,16]</sup>。常用的制备方法主要有:熔模铸造法、冲孔网冲压-钎焊法、钢板网折叠-钎焊法、三维编织法、增材制造法、挤压线切割法、搭接拼焊法等。

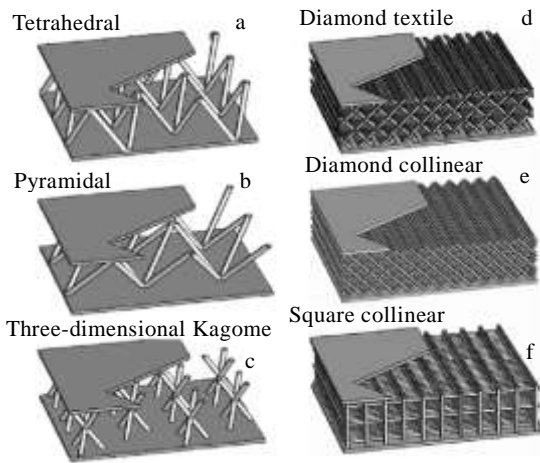


图 2 点阵结构的类型

Fig.2 Examples of lattice truss topologies configured as the cores of sandwich panel structures: (a) tetrahedral lattice, (b) pyramidal lattice, (c) three-dimensional Kagome lattice, (d) diamond textile, (e) diamond collinear lattice, and (f) square collinear lattice<sup>[11]</sup>

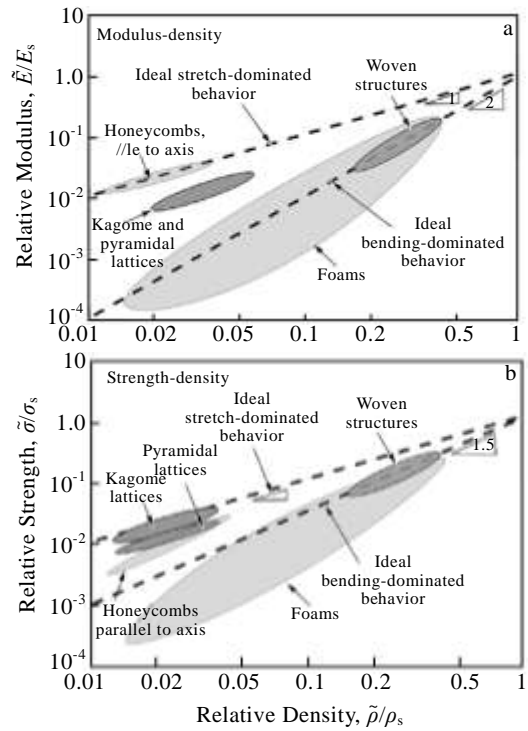


图 3 多孔金属力学性能

Fig.3 Mechanical properties of porous metal: (a) elastic modulus and (b) yield strength<sup>[13]</sup>

### 2.1 熔模铸造法

英国剑桥大学的研究者<sup>[17-20]</sup>提出了熔模铸造法制备金属点阵结构(图4),具体工艺过程是:先用聚酯做成单层带有定位孔的聚酯牺牲模,一般采用增材制造的方法。然后在树脂芯模的外部包覆一层陶瓷涂层,将树脂芯模熔掉,将型壳放入到砂型中,在其中浇铸入金属熔体,待金属冷却后去除陶瓷凝壳,从而制备出金属三维点阵结构,图4是铸造工艺过程。利用该工艺制造出的八面体点阵材料胞元尺寸可以小到几个毫米,单元直径可以达到1~2 mm。

熔模铸造法对熔融液态金属的流动性具有较高要求,仅限于具有高流动性的有色铸造合金。熔模铸造法工艺流程极其复杂,需要制造模具成本高,且容易产生缺陷。采用熔模铸造方法可制备金字塔型、四面体型、3D Kagome的点阵结构。材料主要包括:铝/硅合金、铜/钼合金、In718、钛合金等。熔模铸造方法难于制造那些采用拓补优化设计的,具有复杂结构的低密度点阵结构,这主要是受金属材料的流动性等限制。采用该方法制造的金属点阵结构的韧性较差<sup>[20]</sup>。在国外,开展这方面研究的主要有剑桥大学、普林斯顿、麻省理工、维多利亚大学、NASA的兰利中心等,针对铝合金、高温合金、铜/钼合金的力学性能<sup>[21-28]</sup>、铝合金点阵结构的热散逸性能<sup>[29]</sup>开展了研究。J. C.Wallach<sup>[23]</sup>研究

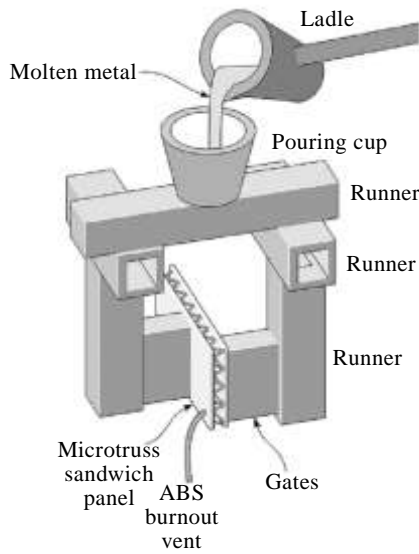


图 4 熔模铸造制备金属三维点阵结构原理图

Fig.4 A wax or acrylonitrile butadiene styrene (ABS) polymer pattern with gates, runners and vents attached. The pattern is coated with a ceramic casting slurry and filled with a metallic alloy<sup>[12]</sup>

了在存在缺陷的情况下，金属点阵结构的力学行为。剑桥大学在金属点阵结构的热散逸性能方面开展了深入研究<sup>[29]</sup>，在孔隙率为0.94，获得了良好的热散逸性能；Q. Z. Li<sup>[30]</sup>采用熔模铸造方法制备了Ti6Al4V三维点阵结构，如图5所示。铸造态点阵结构还需要经过一个热等静压处理，工艺为：900 °C/103 MPa/2 h。Q. Z. Li<sup>[31]</sup>采用熔模铸造的方法制备了Ti6Al2Sn4Zr2Mo合金的三维点阵，筋条直径为3.2 mm时，极限压缩强度达到了30 MPa以上。

### 2.2 金属丝扩散连接或钎焊法

合金丝扩散连接法是将金属丝按照不同的角度逐层叠层后，然后通过最上面的压块来实现层间扩散连接或钎焊连接的方法。合金丝扩散连接法制备的常用

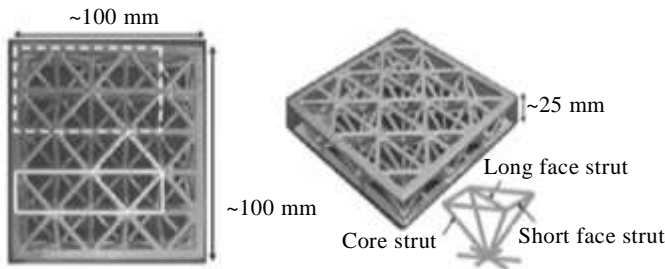


图 5 熔模铸造法制备的钛合金点阵

Fig.5 Titanium alloy lattice structure fabricated through lost wax casting method<sup>[30]</sup>

材料有不锈钢、铜合金等材料<sup>[32-37]</sup>。通过对316不锈钢扩散连接点阵结构性能的研究发现，扩散连接或钎焊连接的点阵结构的比强度不如金字塔型、四方蜂窝结构<sup>[33]</sup>。采用管件叠层后进行钎焊连接或扩散连接，可以制备出管材的点阵结构<sup>[36,37]</sup>。通过对扩散连接法制备的铜点阵结构研究表明，在孔隙率为0.75时，铜点阵结构具有最好的热散逸性能<sup>[38,39]</sup>。H. N.G. Wadley<sup>[40]</sup>研究了金属丝扩散连接制备钛合金点阵的方法，工艺如图 6。其中钛合金丝是Ti6Al4V，直径为0.254 mm，采用专用工装将钛合金丝沿纵横垂直的方向排布，相邻钛丝之间采用不锈钢钉隔开。为了避免相邻层的钛丝叠层时粘连，在钛丝表面涂覆了硼镍合金涂层。金属丝扩散连接制备点阵结构，可以是双线性的，也可以是编织后通过叠层连接(图7b)。点阵结构组装完毕后，在其上面放置重物，在900 °C/1.33 × 10<sup>-5</sup> Pa/6 h条件下实现钛丝层间连接。采用钎焊的方法将点阵结构与厚2 mm的Ti6Al4V面板连接在一起来制备夹层结构，钎料选用TiCuNi-60，工艺为：以20 °C/min的速度升温至550 °C，保温5 min，再升温至975 °C，保温30 min，真空度为1.33 × 10<sup>-5</sup> Pa。图8是制备的不同角度的双线性点阵结构。图 9 则是采用双线性金属管制备的点阵结构<sup>[36,40]</sup>。

P. Moongkhamklang<sup>[41-43]</sup>采用物理气相沉积方法制备出涂覆了钛合金基体的SiC单丝，以复合材料单丝代替钛丝，制备了钛基复合材料(TMC)三维点阵结构。其中物理气相沉积法包括磁控溅射物理气相沉积法(MS-PVD)、电子束物理气相沉积法(EB-PVD)、三极溅射物理气相沉积(TS-PVD)<sup>[44]</sup>。层间单丝连接的工艺参数为：900 °C/1.5~5 MPa/4 h/1.33 × 10<sup>-5</sup> Pa，点阵结构

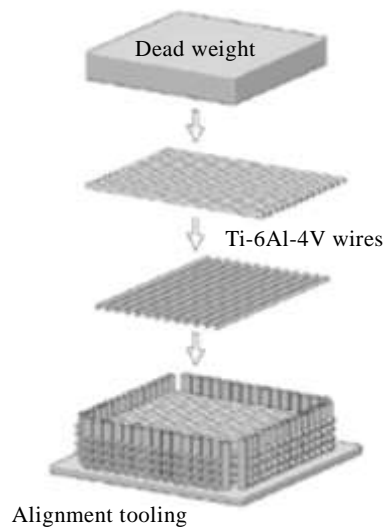


图 6 Ti6Al4V点阵结构的组装过程

Fig.6 Assembly sequence of Ti6Al4V lattice<sup>[40]</sup>

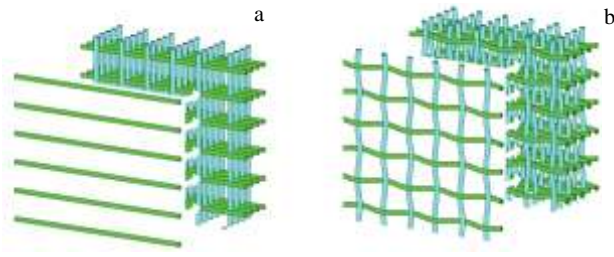


图7 点阵结构的组装形式

Fig.7 Sketches illustrating the manufacturing of the collinear (a) and textile cores (b)<sup>[40]</sup>

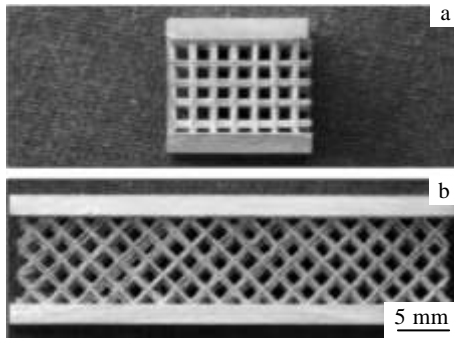


图8 Ti6Al4V三维点阵结构

Fig.8 Front view of square (a) and diamond (b) for Ti6Al4V three dimensional lattice structure<sup>[40]</sup>

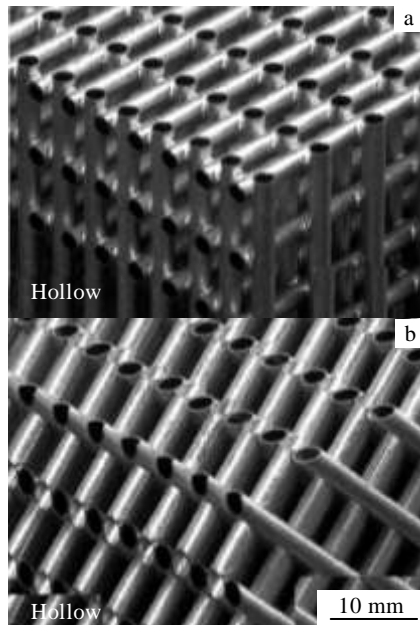


图 9 双线性金属管制备的点阵结构

Fig.9 Bilinear metal lattice structure: (a) square orientation (0°/90°) and (b) diamond orientation of solid and hollow microtruss lattice structures ( $\pm 45^\circ$ )<sup>[36]</sup>

与面板钎焊工艺参数为：975 °C/0.01~0.05 MPa/0.5 h/1.33 × 10<sup>-5</sup> Pa，钎料为TiCuNi-60。

### 2.3 塑性变形法

塑性成形法是指采用塑性加工的方法使金属网格板发生塑性变形，形成金字塔型、四面体型等形式的夹芯，然后通过焊接的方法将夹芯与面板连接在一起<sup>[9-11]</sup>。塑性变形法用于加工难变形材料，当筋条较宽时难度较大，易发生断梗、回弹等问题。因此，塑性变形法一般用于制备铝合金、不锈钢三维点阵结构。折叠铝板网制备金字塔点阵的成本低、可大批量生产，具有大规模应用的潜力。

图10是采用冲孔网冲压成形法的原理图，先将金属板冲裁成网状的板材，再经过压制成形为点阵芯板，为了制备点阵夹层结构，一般采用钎焊的方法将芯板和面板连接在一起<sup>[45-49]</sup>。不锈钢点阵一般采用冲孔网来成形，但钢板网的成形控制难度大，强度高，存在很难折叠形成结点焊接平台的问题。张钱城<sup>[50-52]</sup>基于冲孔网冲压成形法制备了一种X型点阵结构，材料为304不锈钢。研究表明，X型点阵结构的压缩峰值强度高出金字塔结构约30%。

冲压成形法制备点阵结构对材料有巨大浪费，有研究者提出了拉伸网折叠技术<sup>[10, 12]</sup>。拉伸网是将原金属板切割后拉伸扩张而制成，其网身轻便且承载能力强。将制备出的拉伸网经过轧机平整处理后冲压折叠便可制备出金属点阵结构，将此点阵芯体与面板进行焊接或胶结工艺连接起来即制备出金属点阵夹层结构，工艺过程如图11。与冲孔网相比，该工艺最大的优点是板网由原张金属板制成，生产过程原料浪费少，大大节约了原材料，但其在制造过程中仍需剧烈变形，只能用于高延展性的材料，导致制成的结构强度较低，且加工工艺较为复杂<sup>[46]</sup>。

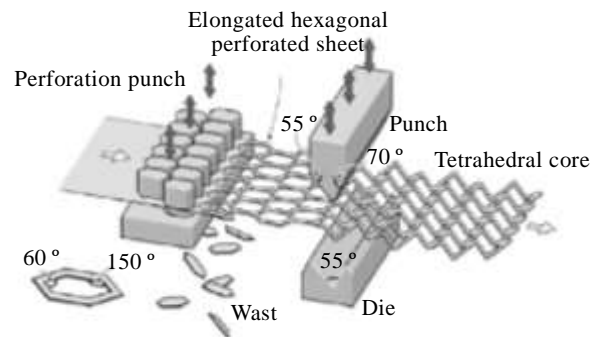


图 10 冲孔网冲压成形法原理图

Fig.10 Principle of punched hole mesh drawing method<sup>[46]</sup>

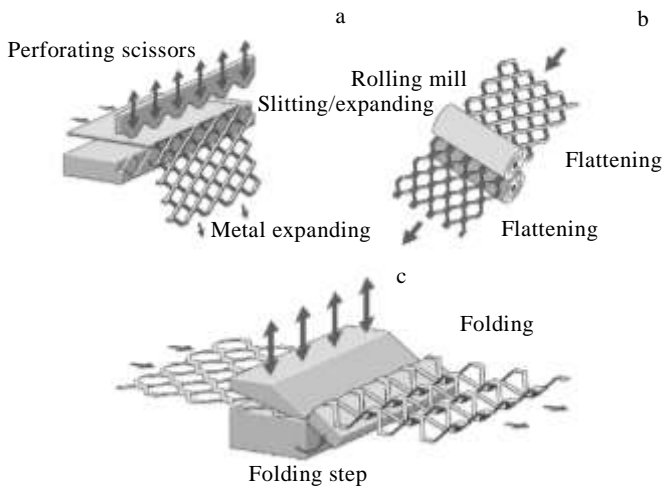


图 11 拉伸网折叠法制备金字塔型点阵结构工艺过程

Fig.11 Schematic of the manufacturing process for pyramidal lattice truss cores: (a) slitting, (b) flattening, and (c) folding<sup>[46]</sup>

穿孔拉伸塑性变形法(perforation-stretching)也是一种点阵结构的塑性加工方法,这种方法首先将网状的板材放置到成形的工装中,在成形时,有的节点被下压,其相邻的节点位置则不动。穿孔拉伸塑性变形法一般用来加工铝合金、不锈钢、镁合金、钛合金等材料<sup>[53-56]</sup>。图12是成形后的点阵芯体。

K. J. Doherty等人采用穿孔拉伸塑性变形法制备了钛合金点阵夹层结构<sup>[53,55]</sup>。为了实现点阵的芯部与面板的连接,采用了钎焊(Braze)、扩散连接(DB)、氩弧焊(GTA)等方法,为了获得更好的界面结合,对连接后的预制件进行了热等静压处理<sup>[55]</sup>。研究表明,钎焊连接的效果较差,通过后续热处理则可以获得良好的界面结合强度,甚至可以将后续HIP工艺省略。压缩试验测试表明,钛合金点阵结构的峰值应力为5.4~7.8 MPa。

D. T. Queheillalt<sup>[56]</sup>采用弯曲后扩散连接的方法制备了一种改进的金字塔型钛合金点阵,如图13所示,其结点位置通过弯曲变形而成。研究表明在钛合金延伸率为10%~15%时,最小弯曲半径与筋条壁厚比的范围为:  $2.5 < R/t < 4$ 。

### 2.4 金属丝编织法

采用编织的方法可以将金属丝直接编织成三维点阵结构,采用编织的方法来制备的WBK(Woven Kagome Structures)结构具有良好的力学性能和各向同性,其主要不足是结构复杂,制造成本高。KIESELSTEIN

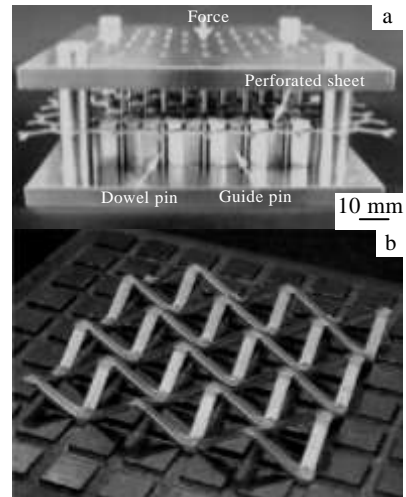


图 12 穿孔拉伸塑性变形法的装置和成形后的芯体

Fig.12 Photographs of apparatus used and set-up for the perforation-stretching method (a) and formed tetrahedral unit cells (b)<sup>[53]</sup>

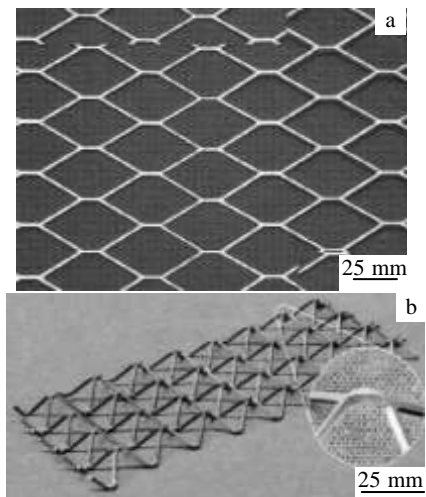


图 13 穿孔拉伸塑性变形前后的点阵结构

Fig.13 Photographs of the periodic asymmetric hexagonal perforation pattern applied to sheets of a Ti6Al4V alloy (a) and the partially formed modified pyramidal lattice (b)<sup>[56]</sup>

公司、Fraunhofer研究所、Dresden大学联合开发了一种三维编织的结构,具有成本低、效率高、性能好的特点。该方法可用于制备钛合金、铝合金、不锈钢、铜合金等材料的编织结构。在这类点阵结构中,金属丝的直径为0.1~2 mm,单元体尺寸为3~20 mm,结构的密度为0.05~2.0 g/cm<sup>3</sup>。目前,KIESELSTEIN公司已经能生产尺寸为1000 mm×1000 mm×50 mm的编织结构,并开发了专用设备。图14是该编织结构的实物<sup>[57-59]</sup>。



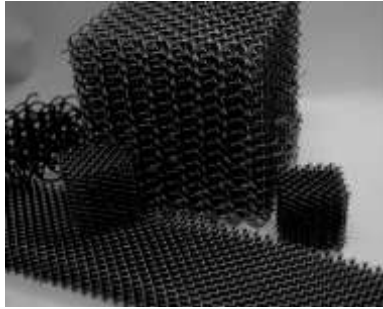


图 14 编织法制备的不同单元尺寸的点阵结构

Fig.14 Different cell sizes and materials lattice structure fabricated by woven method<sup>[58]</sup>

J. C. Wallach、L. J. Gibson<sup>[60,61]</sup>开发了一种编织点阵结构的方法，并采用点焊的方法将面板与编织结构组装成夹层结构。图15a是将金属丝弯曲成折线，图15b是将金属丝编织成为三维点阵结构，图15c是将面板与三维点阵芯板点焊在一起，制备成三维点阵夹层结构。

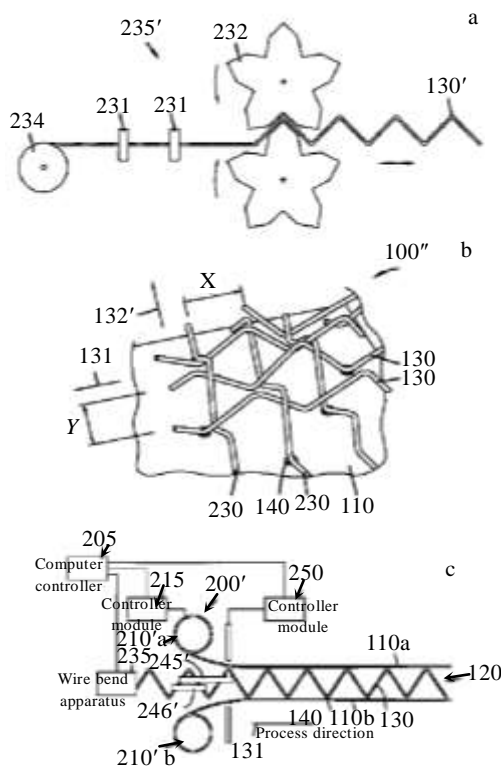


图15 金属丝编织后制备点阵夹层结构工艺

Fig.15 Process of lattice structure sandwich after metal wire weaving: (a) a wire bending device, (b) an embodiment of the truss core sandwich panel, and (c) an apparatus for fabrication of a truss core sandwich panel<sup>[60]</sup>

J. H. Lim<sup>[61]</sup>介绍了多种金属丝编织方法，主要有 Straight bulk octet方法、Bulk woven Kagome方法、Circular spring Kagome方法，图16给出了不同类型的编织结构。

### 2.5 增材制造法

增材制造 (Additive Manufacturing, AM) 技术是采用材料逐渐累加的方法制造实体零件的技术，是近年来发展起来的一种新型点阵结构制造方法，用于制备金属点阵等周期性多孔结构具有很多优势<sup>[62-64]</sup>，它对零件的复杂程度不敏感，越是复杂的结构越是显示出其优越性，设计和制造的自由度较大。

#### 2.5.1 电子束增材制造金属点阵

电子束增材制造技术是以电子束为热源，采用送丝或铺粉的方法来成形的。送丝的方法又称为电

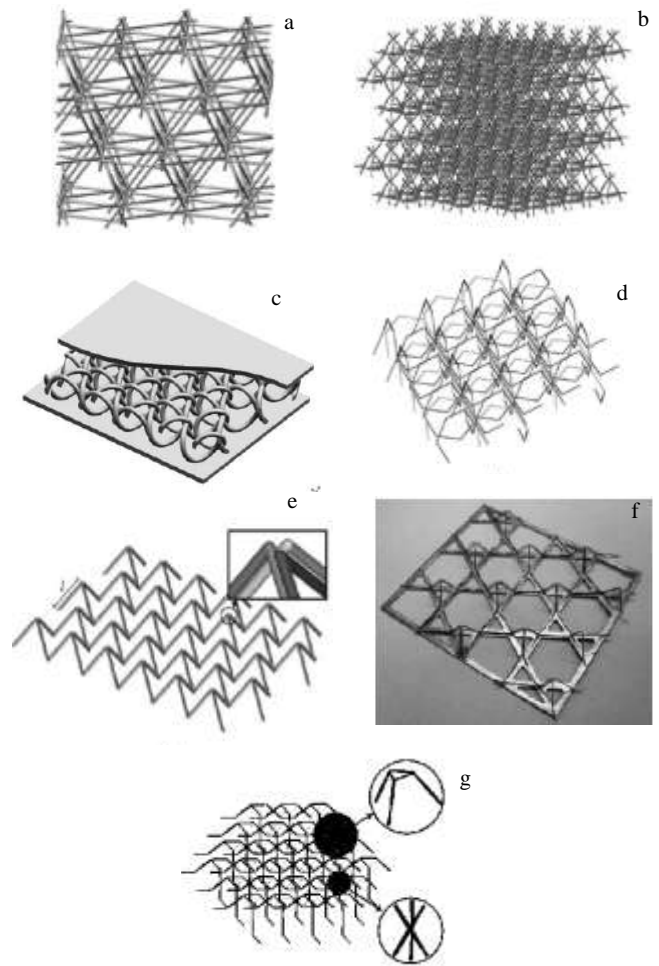


图 16 金属丝编织结构

Fig.16 Structure fabricated with wires: (a) straight bulk octet, (b) bulk woven Kagome, (c) circular spring Kagome, (d) hexagonal spring Kagome, (e) dual wired octet, (f) dual wired Kagome-1, and (g) dual wired Kagome-2<sup>[61]</sup>

子束自由成形(Electron Beam Freeform Fabrication, EBFF), 采用电子束对刚刚铺覆到预制坯表面的金属丝进行熔覆, 从而按照轨迹逐层烧结出零件。NASA的Langley中心、Sciaky公司开发了电子束送丝成形技术<sup>[65]</sup>, 主要用于制造大尺寸结构件, 其特点是成形速度快、效率高; 铺粉的方法又称为电子束选区熔覆成形(Selective electron beam melting, SEBM), 该方法通过操纵磁偏转线圈来实现在金属粉末铺覆的粉床上不同的位置聚焦, 从而逐层扫描烧结出具有各种形状的零件。瑞典的Arcam公司开发了电子束选区熔覆成形技术, 并开发了专用设备<sup>[66-71]</sup>。采用电子束扫描成形钛合金粉末, 每层扫描的厚度为0.07 mm, 每小时的扫描高度可以达到3~6 mm, 设备最大的扫描尺寸为300 mm×300 mm。

研究者对电子束成形点阵结构的力学性能进行了研究和分析<sup>[72-78]</sup>。采用电子束选区熔覆技术常常被用于制备医用钛合金植入体结构。采用增材制造方法最大的特点是可以根据每个人的具体情况设计和制造适用的植入体。采用电子束成形方法制备的人工植入体点阵结构的孔尺寸为100~400 μm, 与人体骨骼具有良好的力学和生物相容性, 强度>100 MPa, 刚度为: 5~20 GPa。另外, 钛合金点阵结构的植入物具有良好的抗疲劳、韧性、抗应力疲劳腐蚀等特性, 在医用领域的应用被看好。

图17给出了SEBM技术制备的钛合金点阵结构在医学领域的应用, 可以用来制造脊柱的植入体以及头盖骨、股骨柄。其中盒形钛合金植入体被脊椎外科手术中用来保持椎间盘的间隔, 用于替代因坏死而去除的组织。O. Cansizoglu<sup>[72]</sup>研究了SEBM工艺制备的点阵结构, 材料为Ti6Al4V, 弯曲和压缩试验表明, 点阵结构构建的角度和方位对材料性能影响很大。在相对密度为0.1时, 其压缩强度为10 MPa, 弯曲模量为20 MPa, 强度对密度比为17。L. E. Murr<sup>[77]</sup>采用SEBM制备的股骨柄的密度只有1.55 g/cm<sup>3</sup>, 刚度约为5 GPa, 与人体接近。

### 2.5.2 激光增材制造金属点阵

激光选区熔覆成形(Selective Laser Beam Melting, SLM)技术也可用于金属点阵结构的制备。与SEBM技术相比较, SLM技术在氩气环境中工作, 该方法可用于制备微小尺寸的各种类型的点阵结构。

J. Wieding<sup>[79]</sup>采用SLM方法制备了不同形式的钛合金点阵结构, 其压缩强度为: 145~164 MPa, 弹性模量为: 3.7~6.7 GPa, 极限应变为: 3.45~6.7, 可以用于制造生物植入材料, 例如股骨柄; B. Gorny<sup>[80]</sup>采用SLM方法制备了Ti6Al4V点阵。研究表明, 经过

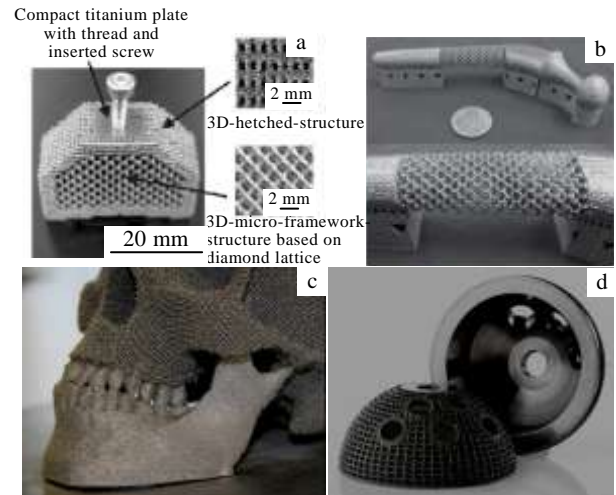


图 17 采用电子束选区熔覆成形方法制备的医用钛合金点阵结构

Fig.17 Medical titanium alloy three dimensional lattice structure fabricated by selective electron beam melting: (a) spine bones, (b) femoral stem, (c) skull bone, (d) acetabular cups<sup>[72,77]</sup>

950 °C/2 h热处理后, 钛合金点阵结构韧性显著提高。在失效的点阵结构断口上, 发现了孔洞引起的断裂。Y. Shen<sup>[81]</sup>采用SLM工艺制备了金属点阵结构。压缩性能测试显示[±45 °]和[±45 °,90 °]的点阵结构是弯曲失效和拉伸失效方式, 而[0 °, ±45 °]是一种垂直立柱的屈曲失效方式; I. Yadroitsev<sup>[82]</sup>采用SLM方法制备了具有过滤功能的多孔结构材料, 材料包括Inconel625、316L, 制备的316L钢的孔尺寸为0.15 mm×0.15 mm×0.12 mm。

G. Kerckhofs<sup>[83]</sup>采用SLM技术制备了Ti6Al4V多孔结构用作骨骼组织。其中网格尺寸为: 0.1~1.0 mm, 点阵结构尺寸为: 直径(3.02±0.05) mm, 平均高度为(11.72 ±0.20) mm。为了提高结构性能, 还开发了一种化学磨削方法, 用于对点阵结构杆单元的表面进行处理, 来提高表面光洁度。经过表面光顺处理的点阵结构的强度和刚度下降显著, 刚度由397.07 MPa下降到226.15 MPa, 强度由13 MPa下降到7.41 MPa, 但是塑性得到提高, 最大应力的应变值由6.04%上升到7.02%。经化学铣削的点阵在受载时的应力和应变分布更加均匀, 但失效机制与未经过化学铣削的相同; D. Leordean<sup>[84]</sup>采用SLM方法制备了Ti6Al7Nb的假体和植入体, 分别在粉末中不掺入和掺入了2%和5%的羟基磷灰石(HA)。成形孔洞的尺寸为0.4~0.6 mm。研究表明不掺杂HA的强度达到436 MPa, 而掺杂了2%HA的强度为346 MPa。利物浦大学的C. Hauser<sup>[85]</sup>研究了一种SLM工艺方法SGM (Spiral Growth Manufacturing),

这是一种革新性的制造工艺，这种方法不用将粉末预铺，而是边沉积边铺覆，从而大大提高了制造效率。采用该方法制备了316不锈钢、钴铬合金。

Mines ParisTech启动了一个“MANSART”计划，目的是为了发展革新性的新结构和功能材料。采用增材制造方法制备了具有负泊松比结构材料。负泊松比材料指的是在拉伸时，在垂直方向表现出膨胀行为，一般负泊松比材料的泊松比在 $-1\sim 0$ 之间<sup>[86]</sup>。

激光近净成形技术(Laser Engineered Net Shaping, LENS)由美国Sandia国家试验室与Allied Signal Inc、Eastman Kodak Co、Hasbro Inc、Laser Fare Inc等公司合作开发，这种方法采用同轴送粉的方法，通过激光束将粉末熔覆后铺覆到预制坯上。LENS方法的效率较高，可用于制备大尺寸的飞机和发动机零件。采用该方法也可以制备多孔结构，受制备工艺本身的限制，一般用于制备一些简单二维多孔结构，难于制备具有复杂空隙的三维多孔结构<sup>[87]</sup>。

### 2.5.3 三维喷墨打印成形制造金属点阵

三维喷墨打印成形方法一般分为2种，1种是液滴注射法(Droplet Jetting)，1种是连续喷墨打印法(Continuous Filament Writing)。三维喷墨打印成形技术往往用于非金属点阵结构的成形<sup>[88-90]</sup>。金属材料实现液滴注射法，往往采用金属化合物或者是金属与树脂等材料的混合物作为原材料，采用液滴注射的方法将其逐层铺覆成形。M. L. Young<sup>[91]</sup>采用三维喷墨打印方法制备了 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Al}$ 复合材料的三维点阵结构，其中点阵筋条直径为 $250\ \mu\text{m}$ ，选用的原材料是将95%的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 和5% (体积分数)的 $\text{ZrO}_2$ 颗粒悬浮于水中后形成的溶液，在空气中风干24 h，再在 $1600\ ^\circ\text{C}$ 烧结2.5 h。E. Hong<sup>[92]</sup>配制了2种以 $\text{TiH}_2$ 为基的墨水，采用三维打印的方法制备出了二维网状的点阵结构，然后将二维网状结构卷绕，经过烧结后制备出了柱状点阵结构，如图18所示。通过压缩性能测试表明，柱状点阵结构的压缩性能与同种材料的钛合金泡沫的力学行为类似，相对密度为55%~64%的柱状点阵结构的压缩分为3个阶段，分别是低应变的线弹性阶段、大塑性变形平台，在高应变时出现很多小的应力下降阶段、应力迅速上升阶段。

金属液滴喷墨打印法是采用热源将金属熔化，然后在气压或重力作用下将熔体通过喷头喷出，铺覆成形出点阵结构。由于需要将金属熔化，还要经过喷头滴下。因此，对低熔点合金研究的较多，其中以铝合金等为主。钛合金的喷墨打印成形，由于钛合金熔炼温度高，流动性差，不太适合用于制备

点阵结构<sup>[93-95]</sup>。

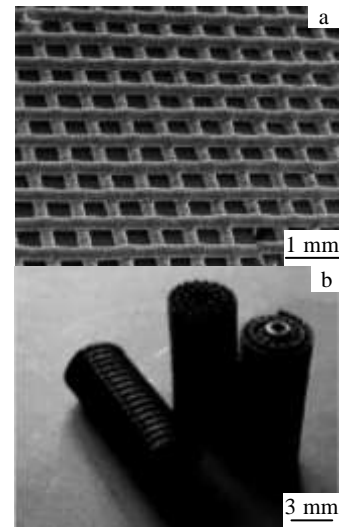


图 18 柱状点阵结构的微观外形

Fig.18 Microscopic view of prismatic lattice structure: (a) SEM micrograph of printed lattice using the  $\text{TiH}_2$  ( $22\ \mu\text{m}$ ) ink and (b) photograph of  $\text{TiH}_2$  scrolls<sup>[92]</sup>

### 2.6 挤压线切割法

D. T. Queheillalt等<sup>[96]</sup>通过挤压线切割法制备出金字塔内芯的金属点阵夹层结构。通过将柱状材料经过加热软化，经模具挤压后得到波纹夹层结构，继而在垂直于挤压方向上通过线切割切除多余的部分，制备出金字塔形的点阵夹芯，如图19所示。此方法免去了面板与内芯的焊接或胶结等连接过程，通过挤压线切割直接制备出了带有面板的金属夹层结构，降低了工作量，提高了效率，材料选择余地变大，同时消除了可能由于焊接不良造成强度降低的影响，但是需要设计模具，成本较高，对材料造成的浪费较大。该方法用于制备筋条和面板较薄的点阵结构难度较大。

### 2.7 搭接拼焊法

H. N. G. Wadley<sup>[12]</sup>提出通过搭接的方法，将中空金属管材拼装成金字塔结构，再通过钎焊或电阻焊等焊接技术将搭接点与面板焊接在一起，如图20所示。与同密度的实心管材相比，中空管材的面积矩更高，其弹性、塑性屈曲程度相应增加，因而制备出的点阵夹芯结构具有更高的抗压强度。搭接拼焊法具有工艺过程简单，成本低、效率高，适用材料范围宽，结构整体性能优良等优点。但是，该方法对焊接技术要求较高，结构整体性欠佳，不利于结构的稳定。

### 2.8 超塑成形法

超塑性是指金属材料在特定条件下具有很高的延伸率而不产生缩颈和断裂的特性，超塑成形



(Superplastic Forming)是利用材料的超塑性来成形复

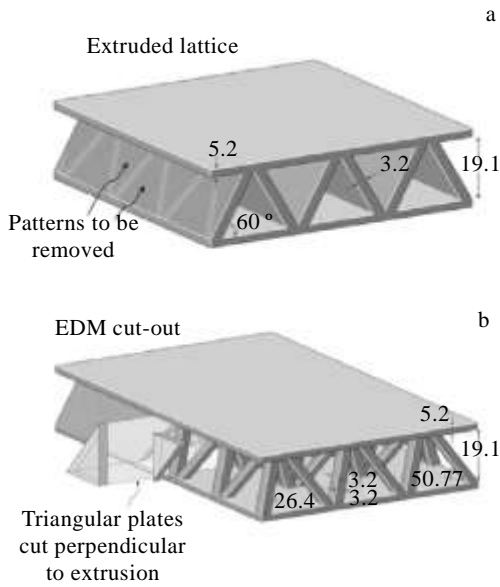


图 19 挤压线切割法制备点阵结构的工艺过程

Fig.19 A micro-truss PCM fabricated using a combined extrusion and electro-discharge machining (EDM) approach: (a) extruded lattice (b) EDM cut out<sup>[96]</sup> (unit: mm)

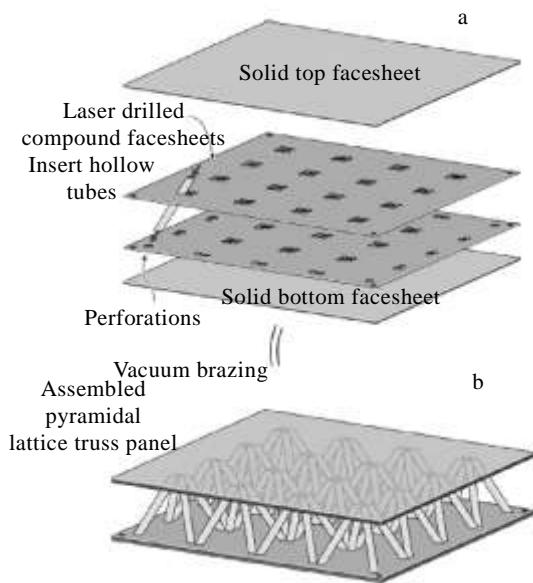


图 20 搭接拼焊法制备点阵结构的工艺过程

Fig.20 Hollow pyramidal lattice truss panel fabricated from tubes and precision drilled compound face sheets: (a) explode graph of lattice structure, and (b) assembled lattice structure<sup>[12]</sup>

杂零件的一种工艺方法<sup>[97,98]</sup>。由于钛合金等金属材料在超塑性状态下具有异常高的塑性，借助模具，加热

或自阻加热，可在一个热循环成形出精度高、性能和表面质量良好的零件。超塑成形/扩散连接工艺 (SPF/DB)是将超塑成形工艺与扩散连接工艺相结合，在相同或相近的温度区间实现空心夹层结构的制备<sup>[98]</sup>。与其它制备工艺方法相比较，SPF/DB工艺最大的特点和优点是具有可选择性，可设计性，可制备各种结构形式的轻质高强夹层结构，将点阵夹层结构可以看作是一种三层或多层SPF/DB结构。因此，李志强<sup>[99-101]</sup>将SPF/DB工艺引入到金属三维点阵等轻质高强夹层结构的制备中，为钛合金等材料的轻质高强结构的制备开发了一种新型的制备方法，图21是制备的不同类型的点阵结构。

采用超塑成形工艺制备钛合金等材料的点阵夹层结构具有很多特点和优点，它可以精确成形出具有复杂外形的点阵夹层结构，不会产生回弹，甚至是一些难扩散连接材料也可以通过先扩散连接后再超塑成形出具有复杂外形的夹层结构。可以方便地实现大尺寸多层复杂点阵结构的制备，设计自由度大，成形后的组织是热机械加工组织，性能高而且稳定。

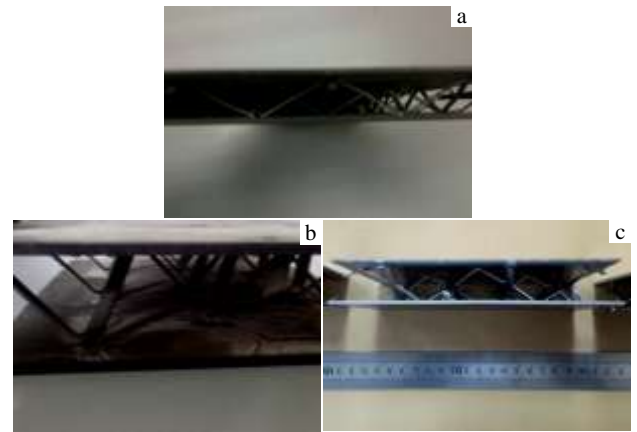


图 21 SPF/DB成形的点阵结构

Fig.21 Three dimensional lattice structure fabricated by SPF/DB: (a) pyramidal lattice structure, (b) tetrahedron lattice structure, and (c) x-type lattice structure<sup>[99-101]</sup>

### 3 结 语

金属点阵结构代表了未来轻质、高强、多功能结构材料发展的一个重要方向，不同的金属三维点阵制备方法各有其优点和特点，适用范围和对象不同。应该在以下几个方面，针对金属点阵结构进一步开展深入研究：

1) 金属点阵结构的主要应用对象是多功能的非关键承载或非承载结构。应该基于多功能、多目标对

点阵结构进行优化设计和制造,例如基于散热、吸波、吸能、结构性能等多目标进行优化设计,从而使制造的金属点阵结构满足多功能的需求。

2) 单一材料和结构难以满足航空航天领域对多功能的需求,应该针对多种材料、多种结构、多种微观组织、多种或梯度性能零件的结构设计,制备方法,力学行为和失效机制等方面开展研究。

3) 增材制造技术在制备微小尺寸的多功能复杂点阵结构时具有优势,SPF/DB工艺在制备大尺寸多功能高性能点阵结构时具有优势,可以将2种点阵结构的特点和优点结合起来,制备出混杂形式的多功能点阵结构。

### 参考文献 References

- [1] Chen Yali(陈亚莉). *Aviation Maintenance & Engineering* (航空维修与工程)[J], 2004, 2: 20
- [2] Han Zhiren(韩志仁), Dai Liangjing(戴良景), Zhang Lingyun(张凌云). *Aeronautical Manufacturing Technology* (航空制造技术)[J], 2009, 4: 64
- [3] Ramrakhyani D S, Lesieutre G A, Frecker M *et al.* *Journal of Aircraft*[J], 2005, 42(6): 1615
- [4] Evans A G, Hutchinson J W, Fleck N A *et al.* *Progr Mater Sci*[J], 2001, 46(5): 311
- [5] Fan Hualin(范华林), Yang Wei(杨卫). *Advances in Mechanics* (力学进展)[J], 2007, 37(1): 99
- [6] Lu Tianjian(卢天健), Liu Tao(刘涛), Deng Zichen(邓子辰) *et al.* *Mechanics in Engineering* (力学与实践)[J], 2008, 30(1): 1
- [7] Yang Yazheng(杨亚政), Yang Jialing(杨嘉陵), Zeng Tao(曾涛) *et al.* *Chinese Quarterly of Mechanics* (力学季刊)[J], 2007, 28(4): 503
- [8] Li Q, Chen E Y, Bice D R *et al.* *Metall Mater Trans A*[J], 2008, 39A: 441
- [9] Liang Yongren(梁永仁), Wu Yinjiang(吴引江), Zhou Ji(周济) *et al.* *Metallic Functional Materials* (金属功能材料)[J], 2012, 19: 59
- [10] Zeng Song(曾嵩), Zhu Rong(朱荣), Jiang Wei(姜炜) *et al.* *Materials Review A* (材料导报 A)[J], 2012, 26: 18
- [11] Wadley H N G, Fleck N A, Evans A G. *Compos Sci Technol*[J], 2003, 63: 2331
- [12] Wadley H N G. *Philos Trsoc A*[J], 2006, 364(1): 31
- [13] Ashby M F. *Philos Troy Soc A*[J], 2006, 364(1838): 15
- [14] Fleck N A, Deshpande V S, Ashby M F. *Proc R Soc A*[J], 2010, 466: 2495
- [15] Queheillalt D T, Wadley H N G. *Acta Mater*[J], 2005, 53(2): 303
- [16] Bouwhuis B A. *Microstructural Strengthening Mechanisms in Micro-Truss Periodic Cellular Metals*[D]. Toronto: University of Toronto, 2009
- [17] Liu Peisheng(刘培生). *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2007, 36(3): 535
- [18] Deshpande V S, Fleck N A, Ashby M F. *J Mech Phys Solids*[J], 2001, 49(8): 1747
- [19] Gu S, Lu T J, Evans A G. *Int J heat Mass Tran*[J], 2001, 44: 2163
- [20] Deshpande V S, Ashby M F, Fleck N A. *Acta Mater*[J], 2001, 49: 1035
- [21] Wadlsy H N G, Fleck N A, Evans A G. *Compos Sci Technol*[J], 2003, 63: 2331
- [22] Deshpande V S, Fleck N A. *Int J Solids Struct*[J], 2001, 38: 6275
- [23] Wallach J C, Gibson L J. *Scripta Mater*[J], 2001, 45: 639
- [24] Wallach J C, Gibson L J. *Int J Solids Struct*[J], 2013, 8: 7181
- [25] Chiras S, Mumm D R, Evans A G *et al.* *Int J Solids Struct*[J], 2002, 39: 4093
- [26] Wang J, Evans A G, Dharmasena K *et al.* *Int J Solids Struct*[J], 2003, 40: 6981
- [27] Zhou J, Shrotriya P, Soboyejo W O. *Mech Mater*[J], 2004, 36: 723
- [28] Sugimura Y. *Mech Mater*[J], 2004, 36: 715
- [29] Kim T, Hodson H P, Lu T J. *Int J Heat Mass Tran*[J], 2004, 47: 1129
- [30] Li Q Z, Chen E Y, Bice D R *et al.* *Metall Mater Trans A*[J], 2008, 39A: 441
- [31] Li Q Z, Chen E, Bice D *et al.* *Adv Eng Mater*[J], 2008, 10(10): 939
- [32] Queheillalt D T, Deshpande V S, Wadley H N G. *J Mech Mater Struct*[J], 2007, 2(9): 1657
- [33] Zupan M, Deshpande V S, Fleck N A. *Eur J Mech A-Solid*[J], 2004, 23: 411
- [34] Lee S, Barthelat F, Moldovan N *et al.* *Int J Solids Struct*[J], 2006, 43: 53
- [35] Sypeck D J, Wadley H N G. *J Mater Res*[J], 2001, 16(3): 890.
- [36] Queheillalt D T, Wadley H N G. *Acta Materialia*[J], 2005, 53: 303
- [37] Liu T, Deng Z C, Lu T J. *J Mech Phys Solids*[J], 2006, 55: 2565
- [38] Kim T, Hodson H P, Lu T J. *Int J Heat Mass Transf*[J], 2004, 47: 1129

- [39] Tian J, Kim T, Lu T J *et al. Int J Heat Mass Tran*[J], 2004, 3(6): 1
- [40] Wadley H N G. *Adv Eng Mater*[J], 2006, A364: 31
- [41] Moongkhamklang P, Elzey D M, Wadley H N G. *Composites: Part A*[J], 2008, 39: 176
- [42] Moongkhamklang P. *Titanium Silicon Carbide Composite Lattice Structures*[D]. Virginia: University of Virginia, 2009
- [43] Moongkhamklang P, Deshpande V S, Wadley H N G. *Acta Materialia*[J], 2010, 58: 2822
- [44] Ward Close C M, Chandrasekaran L, Robertson J G. *Mater Sci Eng A*[J], 1999, 263: 314
- [45] Wadley H, Dharmasena K, Chen Y *et al. Int J Impact Eng*[J], 2008, 35: 1102
- [46] Kooistra G W, Wadley H N G. *Mater Des*[J], 2007, 28: 507
- [47] Kooistra G W, Deshpande V S, Wadley H N G. *Acta Materialia*[J], 2004, 52: 4229.
- [48] Mori L F, Lee S, Xue Z Y *et al. J Mech Mater Struct*[J], 2007, 2(10): 1981
- [49] Cao Qi(曹琦), Gao Peng(高鹏), Zhong Yi(钟毅) *et al. Materials Review B(材料导报 B)*[J], 2011, 25: 104
- [50] Zhang Qiancheng(张钱城), Han Yunjie(韩云杰), Chen Changqing(陈常青) *et al. Science in China E(中国科学 E)*[J], 2009, 39(6): 1039
- [51] Zhang Qiancheng(张钱城), Chen Aiping(陈爱萍), Chen Cahngqing(陈常青) *et al. Science in China E(中国科学 E)*[J], 2009, 39: 1216
- [52] Zhang Qiancheng(张钱城), Han Yunjie(韩云杰), Lu Tianjian(卢天健) *et al. Academic Journal of Xi'an Jiaotong University(西安交通大学学报)*[J], 2010, 44(44): 61
- [53] Sypeck D J, Wadley H N G. *Adv Eng Mater*[J], 2002, 4(10): 759
- [54] Yu H M. *The Architectural Optimization of Stretch-Formed Ceramic-Aluminum Microtruss Composites*[D]. Toronto: University of Toronto, 2012
- [55] Doherty K J, Tice J R, Szewczyk S T *et al. Welding Journal*[J], 2007, 86(9): 41
- [56] Queheillalt D T, Wadley H N G. *Mater Des*[J], 2009, 30: 1966
- [57] Lee Y H, Choi J E, Kang K J *et al. Chicago (2006) ASME 2006 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*[C]. Chicago: American Society of Mechanical Engineers, 2006
- [58] Kieselstein E, Plachel R, Adam F *et al. Cellmet 2008 2nd International Symposium*[C]. Dresden: Northern Jiaotong University, 2008
- [59] Lefebvre L P, Banhart J, Dun D C *et al. Adv Eng Mater*[J], 2008, 10(9): 775
- [60] Wallach J C, Gibson L J. *US Patent*, 6 644 535[P]. 2003
- [61] Lim J H, Kang K J. *Mater Trans*[J], 2006, 47(9): 2154
- [62] Zhao Baojun(赵保军), Shi Fazhong(施法中). *Mechanical Engineer(机械工程师)*[J], 2001, 11: 20
- [63] Campoli G, Borleffs M S, Amin Yavari S *et al. Mater Des*[J], 2013, 49: 957
- [64] Vaezi M, Seitz H, Yang S *et al. Int J Adv Manuf Technol*[J], 2013, 67(5-8): 1957
- [65] Karen Taminger M, Robert A. *US Patent: NASA/TM*[P]. 2006
- [66] Yang Xin(杨鑫), Tang Huiping(汤慧萍), He Weiwei(贺卫卫) *et al. Titanium Industry Progress(钛工业进展)*[J], 2007, 24(3): 10
- [67] He Wei(何伟), Qi Haibo(齐海波), Lin Feng(林峰) *et al. Electromachining & Mould(电加工与模具)*[J], 2006, 1: 58
- [68] Garrett Ryan E, Pandit A S, Apatsidis D P *et al. Biomaterials*[J], 2008, 29(27): 3625
- [69] Murr L E, Abhay P S, Apatsidis D P *et al. J Mech Behav Biomed Mater*[J], 2009, 2: 20
- [70] Murr L, Li S L, Tian Y X *et al. J Mater*[J], 2011, 4: 782
- [71] Lefebvre L P, Banhart J, Dunand D C. *Adv Eng Mater*[J], 2008, 10(9): 775
- [72] Cansizoglu O, Harrysson O, Cormier D *et al. Mater Sci Eng A*[J], 2008, 492: 468
- [73] Harrysson O L A, Cansizoglu O, Marcellin Little D J *et al. Mater Sci Eng C*[J], 2008, 28: 366
- [74] Heinel P, Korner C, Singer R F. *Adv Eng Mater*[J], 2008, 10: 882
- [75] Heinel P, Rottmair A, Korner C. *Adv Eng Mater*[J], 2007, 9: 360
- [76] Heinel P, Korner C, Singer R F. *Adv Eng Mater*[J], 2008, 10(9): 1
- [77] Murr L E, Gaytan S M, Martinez E *et al. J Biomater*[J], 2012, 245 727: 1
- [78] Yang Xin(杨鑫), Xi Zhengping(奚正平), Liu Yong(刘咏) *et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2009, 38(7): 1272
- [79] Wieding J, Jonitz A, Bader R. *J Mater*[J], 2012, 5: 1336
- [80] Gorny B, Niendorf T, Lackmann J *et al. J Maier Mater Sci Eng A*[J], 2011, 528: 7962
- [81] Shen Y, Mckown S, Tsopanos S *et al. J Sandw Struct Mater*[J], 2010, 12(2): 159.
- [82] Yadroitsev I, Shishkovsky I, Bertrand P *et al. Appl Surf*

- Sci[J], 2009, 255(10): 5523
- [83] Kerckhofs G, Pyka G, Loeckx D *et al.* *The 10th European Conference on Non-Destructive Testing*[C]. Moscow: The British Institute of Non-Destructive Testing, 2010
- [84] Leordean D, Marcu T, Radu S A. *J Manuf Eng*[J], 2011, 9(3): 1
- [85] Hauser C, Sutcliffe C, Egan M *et al.* *J Manuf Eng*[J], 2005, 8: 16
- [86] Rehme O, Emmelmann C. *J Lasermicro Nanoen*[J], 2009, 4(2): 128
- [87] Krishna B V, Bose S. *Acta Biomater*[J], 2007, 3(6): 997
- [88] Gratson G M, Garcia S F, Lousse V *et al.* *Adv Mater*[J], 2006, 18: 461
- [89] Smay J E, Cesarano J, Lewis J A *et al.* *Langmuir*[J], 2002, 18(14): 5429
- [90] Lewis J A, Gratson G M. *Mater Today*[J], 2004, 7-8: 32
- [91] Young M L, Rao R, Almer J D *et al.* *Acta Mater*[J], 2009, 57: 2362
- [92] Hong E, Ahn B Y, Shoji D *et al.* *Adv Eng Mater*[J], 2011, 13(12): 1122
- [93] Gutmark E, Parr T P, Hanson-Parr *et al.* *The Combustion Institute Spring Meeting*[C]. Davis: University of California, 1994
- [94] Strayer B A, Jabbari F, Dunn-Rankin *et al.* *Twenty-Seventh Symposium (International) on Combustion*[C]. Pittsburgh, PA: Combustion Institute, 1998
- [95] Orme M, Liu Q B, Smith R. *Alum Trans*[J], 2000, 3(1): 95
- [96] Queheillalt D T, Murty Y, Wadley H N G. *Scripta Mater*[J], 2008, 58: 76
- [97] Ding Hua(丁桦), Zhang Kaifeng(张凯锋). *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2004, 14(7): 1059
- [98] Li Zhiqiang(李志强), Guo Heping(郭和平). *Aeronautical Manufacturing Technology*(航空制造技术)[J], 2004, 11: 1
- [99] Li Zhiqiang(李志强), Zhao Bing(赵冰). *China Patent*(中国专利), 201210475547.8[P]. 2013
- [100] Li Zhiqiang(李志强), Zhao Bing(赵冰), Hou Hongliang(侯红亮) *et al.* *China Patent*(中国专利), 201310594990.1 [P]. 2014
- [101] Li Zhiqiang(李志强), Zhao Bing(赵冰), Hou Hongliang(侯红亮) *et al.* *China Patent*(中国专利), 201210477451.5[P]. 2013

## Research Progress on Fabrication Methods of Metal Three Dimensional Lattice Structure

Zhao Bing<sup>1</sup>, Li Zhiqiang<sup>1</sup>, Hou Hongliang<sup>1</sup>, Han Xiuquan<sup>1</sup>, Liao Jinhua<sup>1</sup>, Tan Zhunli<sup>2</sup>, Bai Bingzhe<sup>2</sup>, Bai Lishuo<sup>2</sup>

(1. Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China)

(2. Beijing Jiaotong University, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The research progress on fabrication methods of metal three dimensional lattice structure is introduced at home and abroad, as well as the characteristics of the methods. SPF/DB (Superplastic forming/Diffusion bonding) process is proposed to fabricate metal three dimensional lattice structure, which regards the lattice sandwich structure as three-layer or multi-layer hollow structure. Typical metal lattice structure including pyramid, tetrahedron and X-type are prepared by SPF/DB in a heat cycle, which validates the SPF/DB process. The characteristics and advantages of additive manufacturing, plastic forming, SPF/DB are compared and the advance of fabrication methods of metal three dimensional lattice structure is forecast.

**Key words:** metal three dimensional lattice structure; fabrication method; SPF/DB

Correspondent author: Zhao Bing, Ph. D., Professor, Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, P. R. China, Tel: 0086-10-85701254, E-mail: zhao6833@163.com