

微桁架点阵结构在飞机结构/功能一体化中的应用*

王向明, 苏亚东, 吴 斌, 张 瑞, 王福雨, 汪嘉兴, 邢本东

(航空工业沈阳飞机设计研究所, 沈阳 110035)

[摘要] 近几年,点阵结构技术随着3D打印等新兴制造技术的发展而快速发展,在结构功能一体化技术应用中表现出巨大潜力。它可作为多功能化的优良设计载体,实现承载、防热、隐身、变体等各项功能的有机融合。但一些关键技术尚待突破,到目前为止尚未见增材制造点阵结构在飞机上大规模应用。结合飞机结构/功能一体化需求,对点阵结构的制造工艺、性能特点和典型应用进行了综述,并从结构设计、制造工艺、性能评价等方面对制约点阵结构工程应用的原因进行了分析讨论。

关键词: 点阵结构/点阵材料; 结构功能一体化; 多功能结构; 增材制造; 优化设计

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2018.10.016



王向明

研究员, 博导, 航空工业沈阳飞机设计研究所项目总设计师, 新型功能结构航空重点实验室主任, 辽宁省增材工程技术研究中心主任, 装备发展部先进制造技术专业组专家, 国防 973 项目技术首席专家。研究方向为飞机先进结构快速响应设计/制造一体化技术。曾获国家技术发明一等奖(1项)、二等奖(1项), 国防科技进步一等奖(2项), 航空报国金奖(3项)。授权发明专利10余项。

随着飞机的升级换代,结构技术正在从“面向性能”向“面向功能”转变,兼具承载与功能特性的多功能结构显得越来越重要。这类结构表现出明显的多约束、多尺度、多材料特点,导致其构型的创新度和复杂度急剧上升,点阵结构是其中的典型代表。由于点阵结构天然的多孔特性和可设计性,成为结构/功能一体化的优良载体^[1-3],但可制造性成为制约其发展的关键瓶颈,增材制造为解决这一瓶颈提供了全新的技术途径。

最近几年增材制造技术表现出巨大的工程应用潜力,并已在多个型号上实现工程化应用^[4-6],人们对增材制造的认识也在逐渐提高。目前,增材制造正处于从结构等代替换到结构创新实现的跨越阶段^[7-8]。点阵结构是传统飞机结构体系中尚不存在的构型元素,是飞机实现结构创新的典型要素之一,在飞机结构应用特

* 基金项目: 航空科学基金项目(20163701002)。

别是结构功能一体化应用中具有重大应用潜力。

战斗机结构/功能一体化需求分析

从第一架喷气式飞机诞生开始,战斗机的发展已经经历了三代,进入第四代研制阶段(美国、俄罗斯等称为第五代)。第一代战斗机以喷气式的高亚音速为主,强调结构的承载特性;第二代战斗机以超音速为标志,对结构的轻质高强提出了较高要求;第三代战斗机追求高机动性,对结构的轻质高效和飞机良好的操控性能需求迫切;第四代战斗机以隐身、超音速巡航、超机动性和先进传感器4项核心指标为典型特征,不仅要求飞机的结构平台具有优良的力学特性,对其功能特性也提出了较高的要求。可以预测,后续的其他飞行器对多功能结构的需求将越来越强烈,结构功能一体化将是军用飞机结构的重要发展方向。

飞机对结构功能一体化的需求,按功能要素可分为二元一体化、三元一体化及多元一体化(图1)。二元一体化是指两种功能要素融合于结构中,这一类多功能结构复杂程度偏低,成熟度相对较高,部分结构已在工程化中实现应用,比如:隐身/隔热一体化、减阻/自洁一体化、天线/隐身一体化等。三元一体化是指三种功能融合于结构中,这一类结构的功能要素偏多,结构复杂程度往往较高,技术成熟度也相对较低,目前尚未实现工程化应用,比如:承载/变体/隔热一体化、隐身/减阻/自洁一体化等。

当前,基于拓扑优化的多功能结构蓬勃发展,但由于多物理场问题分析求解困难,现有设计大多集中在只考虑2~3个独立的物理场。考虑多物理场耦合、多目标的拓扑优化设计仍处于探索研究阶段,目前尚不具备工程化应用成熟度,因此解决三元一体化及以上的多功能结构设计与应用将是下一步研究的重点方向。

的区别在于几何尺寸方面,点阵结构的尺寸为毫米级或微米级,远小于工程结构的相应尺寸。正因为如此,该结构同时具有结构和材料双重特点,既可作为结构用经典的结构力学方法进行分析,也可作为材料用经典连续介质力学来分析。由此,点阵结构的性能取决于两组独立的参量,一组是描述其内部几何结构的尺寸参量,

另一组是描述其材料性质的材料参量。也就是说,对不同结构或材料的点阵结构,支配其结构-形状关系的机理可能大相径庭。

2 点阵结构的制造工艺

2.1 增材制造法

增材制造是指采用材料逐渐累加的方法制造实体零件的技术,相对于传统的材料“去除-切削”加工

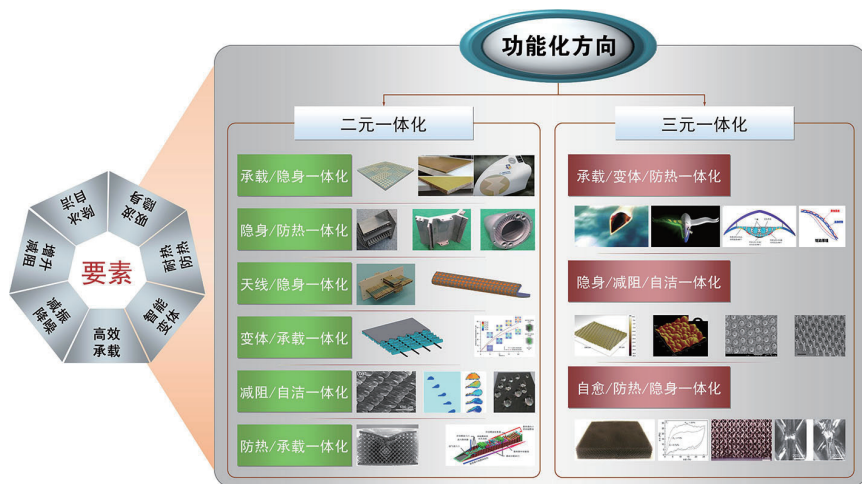


图1 飞机主要多功能需求

Fig.1 Main multi-functional requirements of aircraft

点阵结构的分类与性能特征

1 点阵结构的定义

点阵结构是多孔材料与结构体系中的重要组成部分^[9-10]。多孔材料与结构(图2)大体上可以分为两大类^[11]:一类是以无序为典型特征的多孔材料/结构(图3),这类材料/结构以泡沫为代表,根据它们的间隙结构还可细分为开孔泡沫材料和闭孔泡沫材料两种,开孔泡沫材料的空隙相互连通,闭孔泡沫材料的空隙则互不连通;另一类是构型有序的多孔结构(图4)^[12-13],按其周期性的维度可细分为二维有序多孔结构和三维有序多孔结构。点阵结构是三维有序多孔结构的一种,由周期性的点阵桁架组成,可以通过桁架单胞的构型和几何尺寸设计实现其功能性的调控。

点阵结构与宏观工程桁架结构

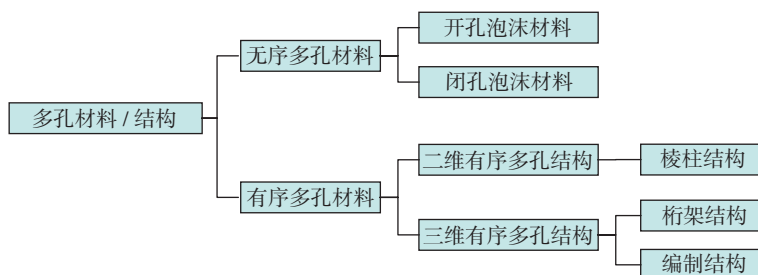
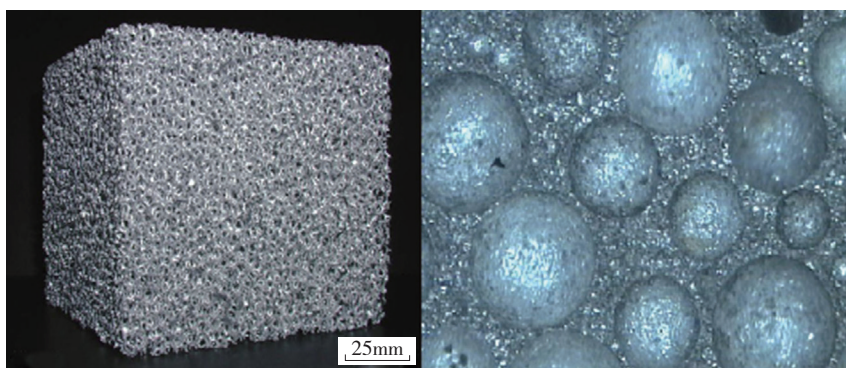


图2 多孔材料/结构的分类

Fig.2 Classification of porous material structure



(a) 开孔泡沫

(b) 闭孔泡沫

图3 无序多孔材料

Fig.3 Disordered porous material

技术,是一种“自下而上”的制造方法。增材制造技术的显著特点是可以制造构型复杂的构件,点阵结构的几何构型复杂,正是增材制造发挥技术优势的最佳结构。使用选区熔化工艺的增材制造技术,可以制造绝大部分复杂构型的微桁架点阵结构(图5),并且这种加工不受结构胞元的构型影响,也不受结构的曲面复杂度影响,在微桁架点阵结构制造方面具有重大应用潜力。

2.2 熔模铸造法

熔模铸造法是指通过使用挥发性石蜡或聚合物制备模具,通过注模成形等方式制造的方法,如图6所示。该方法中,首先在挥发性格子体

上涂覆陶瓷浆料,干燥后通过熔化或蒸发将挥发物去除,接着在空模中充入液态金属,冷却凝固并清除陶瓷铸模后可得到微桁架点阵结构。该法除了可制造四面体和3D-kagome胞元等常见微桁架点阵结构外,还可制造具有复杂曲面的非平面形状结构。随着快速成形技术的发展,模具可实现快速成形,在制备更加复杂的微桁架点阵结构方面更具优势。

2.3 变形成形法

结构相对简单、周期性较强的微桁架点阵结构可以通过变形成形法制造。变形成形法是指对一定形状的薄板材进行加压,形成具有四面体等胞元结构的微桁架点阵结构(图

7)^[14]。这种方法可以获得孔径尺寸在1mm至数厘米之间的各种各样的微桁架点阵结构。压缩完成后,可以通过多种连接方法来形成节点,比如:阻焊、扩散连接、铜焊、过渡液相工艺等。过渡液相连接工艺包括将分散在黏接剂中的合金以浸渍或喷涂的方式涂覆到待连接的材料上,目前已经研制出许多这样的材料。

2.4 金属丝编织法

金属丝编织法是指通过金属丝编织的方式,按照设计的微桁架点阵结构进行编织的方法。金属丝的编织技术具有操作简单、成本低廉的优点,适合于拉丝的任何合金都可以使用该方法来制造。这里的金属丝为实心丝体,因为空心丝体具有较高的弯曲阻力并在塑性弯曲时趋于不对称屈曲等问题,从而导致编制过程较为困难。编织前将丝体预卷边或编制后将一些结点进行点焊可获得良好的效果。微桁架点阵结构可通过这种织物的堆积和节点之间的过渡液相技术连接而获得。该方法的局限是适用于大型结构相对简单,且没有复杂曲面的结构,具有复杂曲面的结构将导致编织体局部富集,无法按设计完成制造。

2.5 金属丝搭接组装法

将金属丝搭接组装后通过节点的过渡液相连接技术或阻焊方式也可获得微桁架点阵结构。使用开槽

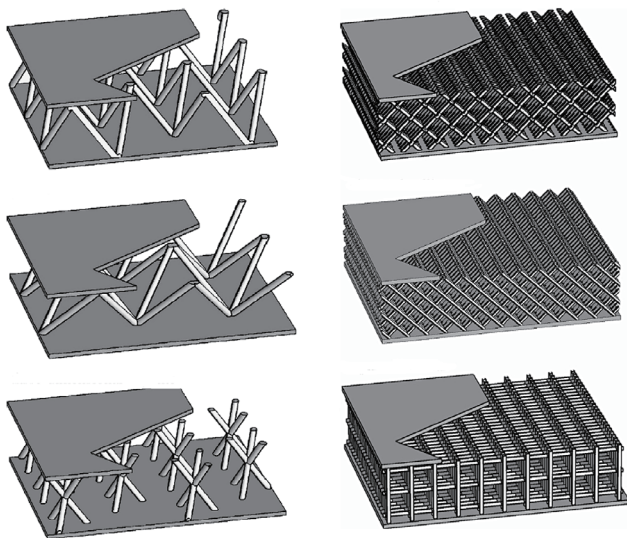


图4 有序多孔结构实例
Fig.4 Example of ordered porous structure

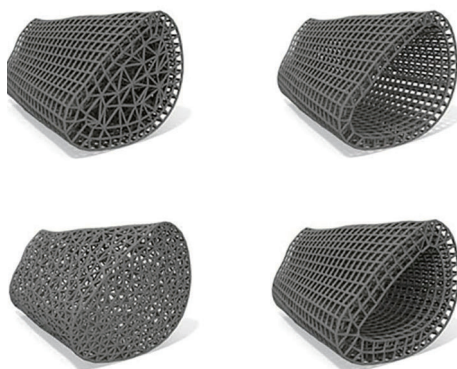


图5 激光选区熔化制备的各种微桁架点阵结构制件
Fig.5 Various micro honing lattice structure parts prepared by SLM

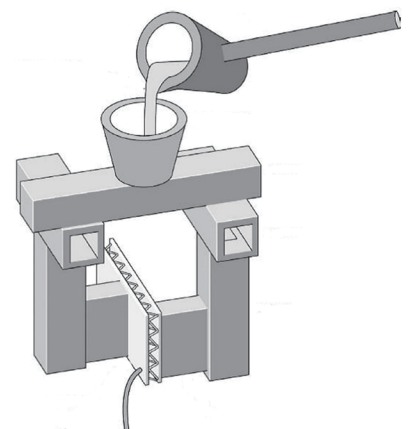


图6 熔模铸造法
Fig.6 Melt mold casting

工具来控制丝体的间隔和取向,可方便地布线 and 变换各层之间丝体的方向。该方法形成的菱形结构和正方形结构微桁架均可以进行机加并连接到面板上。相对于金属丝编织法,本方法具有诸多的优点,如可更直接地保持整个结构的孔穴排列、无序预卷边,还可以使用中空体等。图8为利用丝层排列工具组装304不锈钢实心丝和中空丝制造微桁架结构的工艺过程^[15]。

2.6 超塑成形法

超塑成形(Superplastic Forming)是利用材料的超塑性来成形复杂零件的一种工艺方法^[16]。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)是结合超塑成形与扩散连接工艺的综合工艺,其最大特点在于结构的选择性与可设计性。在大部分大规格3层或多层点阵结构制备方面有较大优势,SPF/DB成形的点阵结构如图9所示。

3 点阵结构的性能特征

3.1 力学特性

点阵结构的力学特性是该领域研究的重点和热点,学者们集中了大量精力对该类结构的承载等力学特性进行研究。微桁架点阵结构是由节点和连接节点的杆单元组成的周期性结构,每个节点连接的杆单元数目与规格决定了微桁架点阵结构的力学性能。微桁架点阵结构在拓扑连接上类似于开口泡沫材料,但两者间存在明显的区别。主要体现在:(1)微桁架点阵结构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;(2)微桁架点阵结构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杆件屈曲不直;(3)微

桁架点阵结构胞元规则,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。

对于简单的板件结构,微桁架点阵结构的力学性能主要取决于胞元结构形式及其空间构型,点阵材料的力学性能取决于杆单元的拉伸特征,材料的模量和强度正比于材料的相对密度。由此,点阵结构的高比强度和比刚度是其力学性能的主要特征。范华林等^[17]对比分析了泡沫材料与点阵结构的模量(图10),发现微桁架点阵结构的刚度明显大于泡沫类材料。Kooistra等^[18]对比分析了基于铝材料的各种结构,包括点阵结构、波纹板、蜂窝结构和泡沫材料等(图11),发现微桁架点阵结构的强度

高于波纹板和泡沫材料,略高于蜂窝结构,特别是在低密度时,这种优势较为明显。Moongkhamklang等^[15]通过Ti-6Al-4V涂覆的SiC丝材制备了毫米级正方和金刚石点阵结构,通过研究不同相对密度下微桁架点阵结构的压缩强度和剪切强度来探讨该类结构的失效模式,他们发现该类结构具有极高的比强度,在进行压缩强度测试时,正方和金刚石点阵结构均表现为弹性屈服;在进行剪切试验时,部分单胞出现拉伸破坏的脆断行为。该研究也得出了微桁架点阵结构的比强度明显高于泡沫材料、蜂窝夹层材料和均质材料的结论,因此该类结构具有基于力学特性的功能化设计的广阔前景。

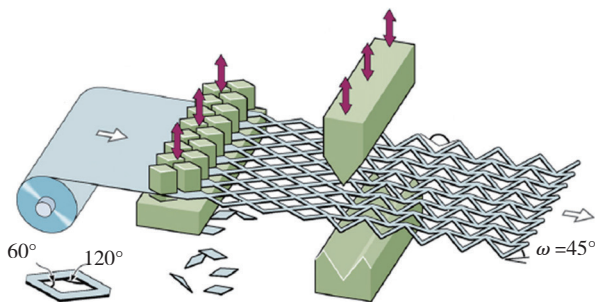


图7 变形成形法制备微桁架点阵结构的工艺过程
Fig.7 Process of fabrication of micro honing lattice structure by deformation forming method

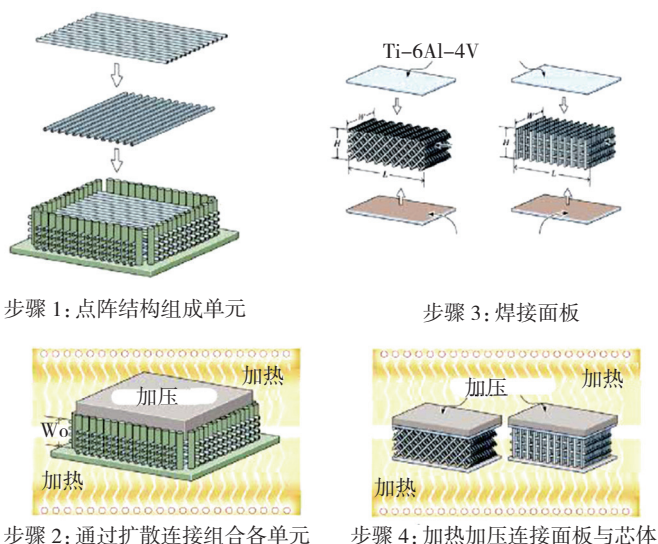


图8 金属丝搭接组合法制备微桁架点阵结构工艺过程
Fig.8 Fabrication process of micro honing lattice structure by wire bonding assembly method

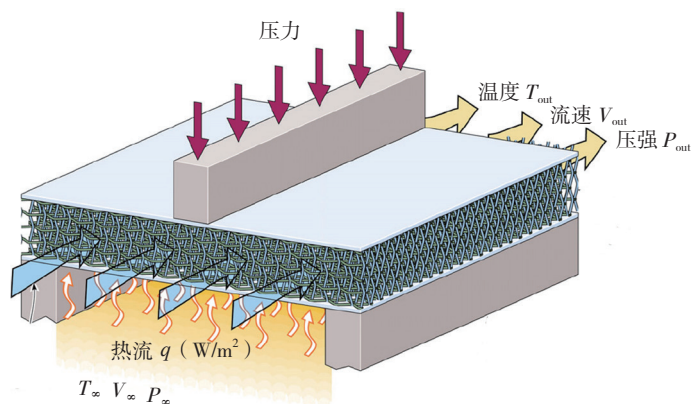


图12 换热特性试验
Fig.12 Heat transfer characteristic test

构型点阵夹层壁板的热结构响应进行了比较。结果显示胞元构型对换热能力和结构强度有较大的影响,相对密度较大、截面尺寸较小、流速较高的条件下有利于主动冷却结构的耦合传热。与槽道式主动冷却结构相比,微桁架点阵结构的最高壁温较低,同时应力集中问题也有所缓解。从轻量化、热防护以及热强度的角度来说,点阵夹层结构用于飞机结构的耐热防热都具有较大的优势。

3.3 振动和声学特性

点阵结构固有的多孔和周期性特征,使其自然成为一种具有特殊声学特性和禁带效应的结构型材料。这种材料应用于特殊的飞机结构部位,能起到隔声的作用,可有效降低各类噪声。另外,微桁架点阵结构可以作为具有禁带效应的声子晶体,制成滤波或导波器件,用于声波和振动的控制,但目前这方面的研究相对较少,从发表的论文来看,仅有部分结构振动理论方面的数值模拟研究。俞鞠梅等^[36]研究了折叠式周期性夹层结构的吸能效率,通过 Abaqus 对 U-I 形折叠式夹层板的压皱性能进行了数值仿真,分析了不同变形模式和夹层结构尺寸对压皱性能的影响。结果表明:变形模式是决定夹层板压皱性能的关键因素,不同的结构参数组合会形成不同的变形模式,进而影响结构的压皱载荷和吸能特性。

李拓等^[37]采用空间桁架结构分析的网架结构连续化方法对点阵多孔金属夹芯板的夹芯层桁架进行了连续化处理,将夹芯层桁架等效为连续介质,并分别推导了金字塔型、四面体型、kagome 型、槽道式 4 种杆型点阵多孔金属夹芯板的抗弯刚度和等效剪切刚度,然后用分解刚度法推导了四边简支条件下点阵多孔金属夹芯板的固有振动频率公式,并与有限元计算结果进行了对比,结果表明,点阵多孔金属夹芯板的振动性能与单胞结构尺寸有密切关系,对固有振动频率公式的分析认为夹芯层高度和桁架杆的截面尺寸对振动性能的影响最大。

娄佳等^[38]研究了复合材料四面体点阵夹芯梁的自由振动特性,结果表明层合面板的铺设角越小,复合材料四面体点阵夹芯梁的固有频率越大。随杆件半径的增加,复合材料四面体点阵夹芯梁的固有频率先增大后减小,各阶固有频率达到极值的位置略有不同,杆件倾斜角度对夹芯梁的固有频率影响较小。增加芯子的高度和缩短梁的长度,都将有效地提高复合材料四面体点阵夹芯梁的固有频率。

点阵结构在多功能一体化设计中的典型应用

点阵结构在飞机结构功能一体

化应用中尚处于起步阶段。由于飞机结构功能化趋势不断加速,传统的结构设计模式面临现代飞机的功能需求时已显得捉襟见肘,结构重量系数快速攀升,功能满足率却逐渐下降。各国的研究者们都在绞尽脑汁探寻解决之道,各种新结构、新材料的研究也层出不穷。虽然点阵结构的研究已经开始了十几年,但由于传统的制造技术在复杂构型和大尺寸结构方面的局限,在过去十几年时间里,点阵结构的研究都处于基础与机理研究阶段,也正是十几年的基础研究积累,使得点阵结构领域的理论研究成果相当全面和系统,从拓扑优化到性能机理、从结构设计到失效模式都已形成系统,这给点阵结构的工程化应用奠定了坚实的基础。

1 金属点阵结构

金属点阵结构是增材制造点阵结构的研究主流,以钛合金、铝合金和高温合金为主,在航空领域多用于应力水平不高的承载构件(提高结构刚度)和散热结构(表 1)、格栅类结构、壳体结构等功能构件。承载结构方面,点阵结构具有高比强度和比刚度,可用于构件局部的刚度增强填充,使构件既满足了力学性能需求,又实现了减重。功能结构方面,可利用点阵结构的大孔隙率,将功能布置在空隙中,实现结构承载、防热、隐身等功能融合(图 13)。

2 非金属点阵结构

非金属点阵结构一般采用光固化或粉末烧结成形工艺制备。材料多以光敏材料、聚酰亚胺、聚醚醚酮、尼龙材料或尼龙基复合材料为主。由于其力学性能不如金属材料,多用于创新结构快速原型制造以及非金属功能构件研制,随着聚醚醚酮等高强度非金属的技术成熟度不断提升,非金属点阵结构有望成为多功能结构的全新一代载体,具有广泛应用价值。

3 微点阵结构

微点阵结构单胞尺寸一般在毫

米以下,材料包括聚合物、金属、复合材料等。这类结构的单胞尺寸较小,表现出优异的力学、电学和磁学性能,可广泛用于自愈合结构、隐身结构、热防护结构等。但由于尺寸效应在这一类结构中表现得极为明显,材料性能对单胞尺寸及相关参数的敏感性较高,导致制件的性能波动性较大,成为制约其应用的主要因素。除此之外,制造效率成为制约其应用的又一重要因素,精度与效率的协调在这一类结构中显得尤为重要,开发高效率设计手段、制造工艺及检测方法是微点阵结构实现工程化应用的关键所在。

4 智能仿生增材制造点阵结构

智能仿生点阵结构是指利用增材制造工艺制备的,可以在时间或空间维度下发生目标形状、性能或功能改变的点阵结构。这属于可编程材料实现自我构建以及重组装的新型制造技术。智能仿生点阵结构在智能变体结构、新型热防护结构、新一代隐身技术及多功能融合中均有重大潜在应用价值。

制约点阵结构工程应用的关键问题

1 制造精度

根据飞机结构一般公差控制要求(HB 5800),制件的行位公差大部分需要控制在 $\pm 0.1\text{mm}$ 以下。目前主流的激光选区熔化设备制造精度在 0.01mm 左右,电子束选区熔化设备制造精度在 0.02mm 左右。虽然其制造精度均高于构件制造公差控制要求,但由于增材制造是一种逐层累加的制造模式,制造偏差也会形成累积效应,导致成品件(后处理前)的制造公差在 $0.2\sim 0.3\text{mm}$ 。值得注意的是,激光/电子束选区熔化制件的后处理会对零件公差形成放大效应。由于以手工操作为主的去支撑、打磨、局部机加等环节存在,定位不准、操作工艺不稳定、操作人员熟练

程度差异等因素会导致处理后制件的局部误差被放大到 0.5mm 以上(图 14)^[39]。如何控制制造精度使其满

足飞机结构的使用要求是点阵结构工程化应用的关键技术壁垒之一。

2 疲劳性能

表1 不同微桁架点阵结构与槽道式主动冷却结构综合性能比较

性能	指标	金字塔	四面体	Kagome	槽道式
轻量化	相对密度 $\rho / \%$	7.8	7.8	7.8	57.1
热防护	对流换热强度	1100	900	1200	400
	结构最高温度 /K	930	1000	910	1030
热强度	最大等效应力 /MPa	184	189	183	275
	塑性应变 /%	0	0	1	4

注:槽道式主动冷却结构的相对密度是去除面板后实体与总体积之比。

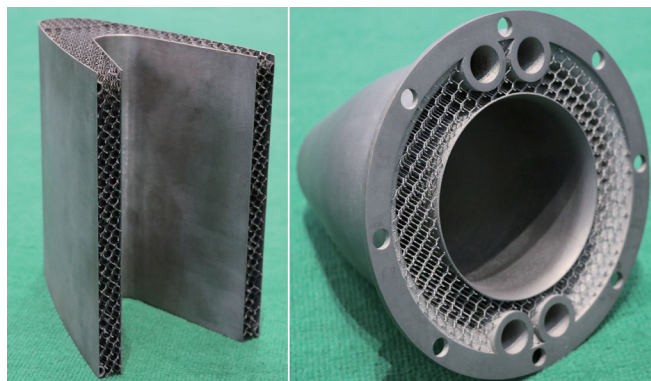
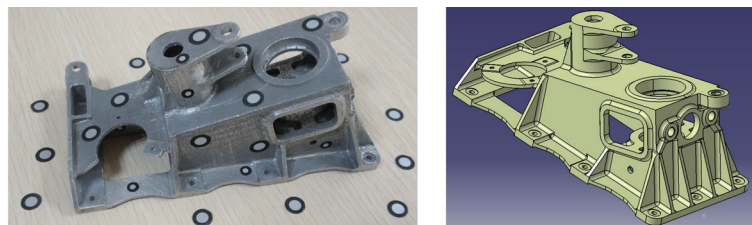


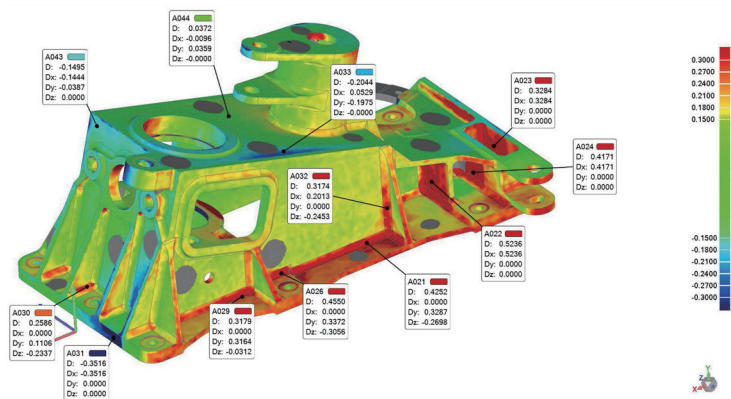
图13 飞机用增材制造金属多功能点阵结构

Fig.13 Multifunction lattice structure of metal in aircraft



(a) 零件图片

(b) 设计数模



(c) 制造精度检测云图

图14 脚踏支座制造精度检测云图

Fig.14 Measuring cloud chart for manufacturing precision of pedal support

增材制造点阵结构的疲劳特性尚未见大量报道。总体来说,影响点阵结构疲劳性能的因素可以分为结构和材料两个层面。材料层面由于点阵结构的杆系表面无法彻底处理,粗糙的表面状态对疲劳性能形成负面影响,同时尺寸效应带来的材料性能衰减也对疲劳性能形成严重影响。结构方面一方面多孔特征有利于阻碍裂纹扩展,提升了结构的疲劳性能,另一方面点阵结构节点处容易形成应力集中。这些复杂的影响因素交织在一起使得对点阵结构的疲劳性能规律掌握变得异常困难。对激光和电子束选区熔化成形四面体、金字塔、kagome 3 类单胞的点阵结构元件开展了 3 点弯曲和 4 点弯曲疲劳试验探索,发现其疲劳分散性极大,尚无一般规律可言(图 15、表 2)。

3 表面粗糙度

激光 / 电子束选区熔化是制造精度较高的增材制造工艺类别,零件的初始表面要明显优于激光送粉、电子束送丝、电弧成形等工艺,因此成为结构功能一体化的优良载体,构型复杂的零件一般采用选区熔化工艺制备。即便如此,制件的原始制造表面(沉积态)粗糙度一般在 $R_a 7\sim 20\mu\text{m}$ 之间(表 3 及图 16),而飞机结构表面粗糙度要求都在 $R_a 6.3\mu\text{m}$ 以下,直接进行吹砂处理对制件表面粗糙度无明显改善,需通过打磨等工艺来改善制件的表面粗糙度。对于点阵结构,其内部呈多孔状分布(图 17),传统打磨工艺很难实现内部抛光。如何在保证效率的情况下改善点阵结构的内表面精度是制约点阵结构应用的又一重大技术瓶颈。

4 优化设计方法与手段

优化设计在点阵结构的工程化应用中极为关键。在工程化应用时,点阵结构在优化设计方面面临 3 个问题。第一是多物理场问题,如前所述多物理场的协同优化目前尚无法

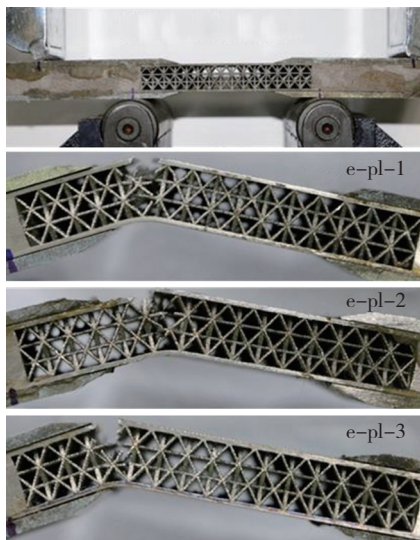


图 15 电子束选区熔化工艺的 4 点弯疲劳失效

Fig.15 Four point bending fatigue failure of electron beam selective melting process

实现,是亟待解决的问题。第二是跨尺度问题,点阵结构的几何尺寸一般是毫米 - 厘米量级,相应构件的尺

表 2 电子束选区熔化工艺的 4 点弯疲劳寿命

试验件编号	寿命
e-pl-1	23604
e-pl-2	127019
e-pl-3	26862



图 16 不同制件表面状态与粗糙度
Fig.16 Surface state and roughness of different parts

寸可达数米,构件的跨尺度效应非常明显。面对这一问题,现有方法依然面临着许多技术难点,比如设计变量多、计算量过大等。如何在设计空间与计算效率上进行权衡,建立适用于工程结构设计的方法依然是未解决的难题。第三是优化手段(软件)的可用性问题。商用软件的成熟需要基于优化方法和算法的成熟,目前的商用软件在设计上在很多环节采用了近似计算或数学替换的方式,导致软件优化计算结果准确性不高、工程实用性不强。到目前为止,熟练使用商用软件按流程设计的这些结构无法满足实际工程应用,对设计员在拓扑优化领域的专业知识要求较高,也成为制约其工程化应用的又一技术瓶颈。

5 性能验证方法与设备

点阵多功能结构可实现多项功能的有机融合,多物理场及构型复杂是其典型特征。与优化设计面临的难点类似,多物理场带来的性能验证方法与验证设备困难是其关键技术。往往这一类结构的性能评价没有现存的标准,需要根据多功能结构的性能和功能定制开发相应的设备,非标设备和非标试验方法将给试验评价的可靠性带来严峻挑战。



图 17 激光选区熔化制件原始表面
Fig.17 Original surface of laser selective laser melting part

表 3 各试样的表面粗糙度 R_a 测试值

试样编号	1	2	3	4	5	6	7	8
初始工艺	沉积态	打磨后	沉积态 + 吹砂	打磨后 + 吹砂	沉积态	打磨后	沉积态 + 吹砂	打磨后 + 吹砂
粗糙度 / μm	7.38	0.73	7.4	1.9	19	1.36	21.5	3.25

结论

点阵结构是结构功能一体化的优良载体,其富裕空间可实现光、电、力、热、声、磁的有效融合。3D 打印等先进制造技术使得复杂高精度点阵结构的物理实现成为可能,点阵结构的应用潜力得以发挥。点阵结构的构型特征和性能属性与传统结构差异明显,除制造外,在设计、检测、验证等环节均需建立配套的技术体系,以挖掘点阵结构的应用潜力,简单的结构等代替无法取得点阵结构带来的技术效益。为此,结构设计一方面需要根据航空结构的多功能需求,形成体系化的应用原则,建立行之有效的设计方法、设计指南及设计规范,实现精准优化和高效设计。检测方面需要大力开发诸如工业全息 CT 等手段,提高检测精度和检测效率。验证方面,需要根据点阵结构的特征,建立适宜的验证技术体系,实现多功能点阵结构的准确评价。

参考文献

[1] DOUGLAS T Q, GERARDO C, PETERSON G P, et al. A multifunctional heat pipe sandwich panel structure[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, 51(1-2): 312-326.

[2] TIAN J, LU T J, HODSON H P, et al. Cross flow heat ex-change of textile cellular metal core sandwich panels[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, 50(13-14): 2521-2536.

[3] EVANS A G, HUTCHINSON J W, ASHBY M F. Multifunctionality of cellular metal systems[J]. *Prog. Mater. Sci.*, 1999, 43(3): 171-221.

[4] 田宗军, 顾冬冬, 沈理达, 等. 激光增材制造技术在航空航天领域的应用与发展[J]. *航空制造技术*, 2015, 58(11): 38-42.

TIAN Zongjun, GU Dongdong, SHEN Lida, et al. Application and development of laser additive manufacturing technology in aeronautics and astronautics[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2015, 58(11): 38-42.

[5] 苏亚东, 吴斌, 王向明. 增材制造技

术在航空装备深化应用中的研究[J]. *航空制造技术*, 2016, 59(12): 42-48.

SU Yadong, WU Bin, WANG Xiangming. Research on further application of additive manufacturing technology on aviation equipment[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2016, 59(12): 42-48.

[6] 王向明, 苏亚东, 吴斌. 增材技术在飞机结构研制中的应用[J]. *航空制造技术*, 2014, 57(22): 16-20.

WANG Xiangming, SU Yadong, WU Bin. Application research of additive manufacturing technology on aircraft structure development[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2014, 57(22): 16-20.

[7] 刘书田, 李取浩, 陈文炯, 等. 拓扑优化与增材制造结合: 一种设计与制造一体化方法[J]. *航空制造技术*, 2017, 60(10): 26-31.

LIU Shutian, LI Quhao, CHEN Wenjiong, et al. Combination of technology optimization and additive manufacturing: an integration method of structural design and manufacturing[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2017, 60(10): 26-31.

[8] 王向明, 崔灿, 苏亚东, 等. 飞机高能束增材制造结构研究[J]. *航空制造技术*, 2017, 60(10): 16-21.

WANG Xiangming, CUI Can, SU Yadong, et al. Aircraft structures technology based on power beam additive manufacturing[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2017, 60(10): 16-21.

[9] 方岱宁, 张一慧, 崔晓东. 轻质点阵材料力学与多功能设计[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009: 4-10.

FANG Daining, ZHANG Yihui, CUI Xiaodong. Light matrix material mechanics and multifunction design[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009: 4-10.

[10] 杨亚政, 杨嘉陵, 曾涛, 等. 轻质多孔材料研究进展[J]. *力学季刊*, 2007, 28(4): 503-516.

YANG Yazheng, YANG Jialing, ZENG Tao, et al. Progress in the research of light porous materials[J]. *Chinese Quarterly of Mechanic*, 2007, 28(4): 503-516.

[11] 卢天健, 徐峰, 文婷. 周期性多孔金属材料的热流性能[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 47-48.

LU Tianjian, XU Feng, WEN Ting. Heat flow properties of periodic porous metal materials[M]. Beijing: Science Press, 2010: 47-48.

[12] HAYDN B Y, WADLEY N G.

Multifunctional periodic cellular metals[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 2006, 364: 31-68.

[13] FLECK N A. An overview of the mechanical properties of foams and periodic lattice materials[J]. *Cellular Metals and Polymers*, 2004(1): 1-4.

[14] GREGORY W K, HAYDN N G W. Lattice truss structures from expanded metal sheet[J]. *Materials and Design*, 2007, 28(2): 507-514.

[15] MOONGKHAMKLANG P, DESHPANDE V S, WADLEY H N G. The compressive and shear response of titanium matrix composite lattice structures[J]. *Acta Materialia*, 2010, 58(8): 2822-2835.

[16] 赵冰, 李志强, 侯红亮, 等. 金属三维点阵结构制备技术研究进展[J]. *稀有金属材料与工程*, 2016, 45(8): 2189-2200.

ZHAO Bing, LI Zhiqiang, HOU Hongliang. Research progress on fabrication methods of metal three dimensional lattice structure[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2016, 45(8): 2189-2200.

[17] 范华林, 杨卫. 轻质高强点阵材料及其力学性能研究进展[J]. *力学进展*, 2007, 37(1): 99-112.

FAN Hualin, YANG Wei. Research progress on lightweight high strength lattice materials and their mechanical properties[J]. *Progress of Mechanics*, 2007, 37(1): 99-112.

[18] 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.

[19] TIAN J, LU T J, HODSON H P, et al. Cross flow heat exchange of textile cellular metal core sandwich panels[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, 50(13/14): 2521-2536.

[20] LU T J, VALDEVIT L, EVANS A G. Active cooling by metallic sandwich structures with periodic cores[J]. *Progress in Materials Science*, 2005, 50(7): 789-815.

[21] LU T J. Heat transfer efficiency of metal honeycombs[J]. *International Journal of Heat Mass Transfer*, 1999, 42(11): 2031-2040.

[22] 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]. *International Journal of Heat Mass Transfer*, 2001, 44(11): 2163-2175.

- [23] KIM T, ZHAO C Y, HODSON H P, et al. Convective heat dissipation with latticeframe materials[J]. *Mechanics of Materials*, 2004, 36(8): 767-780.
- [24] KIM T. Fluid-flow and heat-transfer in a lattice-frame material[D]. Cambridge: University of Cambridge, 2004.
- [25] KIM T, HODSON H P, LU T J. Fluid-flow and endwall heat-transfer characteristics of an ultralight lattice-frame material[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, 47(6-7): 1129-1140.
- [26] KIM T, HODSON H P, LU T J. Pressure loss and heat transfer mechanisms in a lattice-frame structured heat exchanger[J]. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 2004, 218(11): 1321-1336.
- [27] TIAN J, KIM T, LU T J, et al. The effects of topology upon fluid-flow and heat-transfer within cellular copper structures[J]. *International Journal of Solids & Structures*, 2004, 47(14-16): 3171-3186.
- [28] CHIRAS S, MUMM D R, EVANS A G, et al. The structural performance of near-optimized truss core panels[J]. *International Journal of Solids & Structures*, 2002, 39(15): 4093-4115.
- [29] EVANS A G, HUTCHINSON J W, ASHBY M F. Multifunction-ality of cellular metal systems[J]. *Progress in materials science*, 1998, 43(3): 171-221.
- [30] EVANS A G, MUMM D R, HUTCHINSON J W, et al. Mechanisms controlling the durability of thermal barrier coatings[J]. *Progress in Materials Science*, 2001, 46(5): 505-553.
- [31] BART-SMITH H, EVANS A G. Measurement and analysis of the structural performance of cellular metal sandwich construction[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2001(43): 1945-1963.
- [32] HUTCHINSON R G, WICKS N, EVANS A G, et al. Kagome plate structures for actuation[J]. *International Journal of Solids & Structures*, 2003, 40(25): 6969-6980.
- [33] 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]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2005, 48(19-20): 4243-4264.
- [34] WEN T, TIAN J, LU T J, et al. Forced convection in metallic honeycomb structures[J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2006, 49(19-20): 3313-3324.
- [35] 罗树坤, 宋宏伟, 黄晨光, 等. 轻质点阵主动冷却壁板热流耦合响应分析[J]. *强度与环境*, 2012, 39(2): 31-40.
- LUO Shukun, SONG Hongwei, HUANG Chenguang. Thermal-fluid-solid coupling analysis of light-weight actively cooled panel with lattice-framed material[J]. *Structure & Environment Engineering*, 2012, 39(2): 31-40.
- [36] 俞鞠梅, 周红, 张延昌. 折叠式夹层结构压皱性能数值仿真[J]. *计算机辅助工程*, 2013, 22(3): 63-70.
- YU Jumei, ZHOU Hong, ZHANG Yanchang. Numerical simulation of folding sandwich crumple performance[J]. *Computer Aided Engineering*, 2013, 22(3): 63-70.
- [37] 李拓, 江俊. 点阵多孔金属夹芯板振动特性分析及优化设计[J]. *动力学与控制学报*, 2009(1): 39-44.
- LI Tuo, JIANG Jun. Vibration characteristics and Optimization of truss-cored metal sandwich plates[J]. *Journal of Dynamics and Control*, 2009(1): 39-44.
- [38] 娄佳, 马力, 吴林志. 复合材料四面体点阵夹芯梁的自由振动分析[J]. *固体力学学报*, 2011(32): 339-345.
- LOU Jia, MA Li, WU Linzhi. Free vibration analysis of all-composite tetrahedral lattice truss core sandwich beam[J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2011(32): 339-345.
- [39] XIONG J, MINES R, GHOSH R, et al. Advanced micro-lattice materials[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2015, 17(9): 1253-1264.

通讯作者: 王向明, E-mail: wangxm601@163.com。

Application for Additive Manufacturing of Lattice Materials on Integrated Aircraft Structures and Functions

WANG Xiangming, SU Yadong, WU Bin, ZHANG Rui, WANG Fuyu, WANG Jiaying, XING Bendong
(AVIC Shenyang Aircraft Design and Research Institute, Shenyang 110035, China)

[ABSTRACT] In recent years, the technology of lattice structure has developed rapidly with the development of additive manufacturing. It has shown great potential in the application of structural and functional integration technology. It can be used as a good design carrier for multi-function, and it can realize the organic integration of various functions such as bearing, heat proof, stealth and variant. However, some key technologies have yet to be broken, and so far there has not been a large scale application of the lattice structure in the aircraft. Combined with the requirement of aircraft structure/function integration, the manufacturing technology, performance characteristics and typical applications of dot matrix structure are reviewed, and the reasons for the application of lattice structure are analyzed and discussed from the aspects of structure design, manufacturing process and performance evaluation.

Keywords: Lattice structure/lattice material; Integration of structure and function; Multifunction structure; Additive manufacturing; Optimizing design

(责编 文竹)