

激光与光电子学进展

热交换器点阵结构优化及其激光选区熔化成形

梁家誉*, 张文扬, 刘伟, 陈冰清

中国航发北京航空材料研究院 3D 打印研究与工程技术中心, 北京 100095

摘要 采用激光选区熔化对 316L 不锈钢粉末进行点阵结构的增材制造试验, 确定了简单立方点阵结构的最小特征尺寸。设计了四种点阵单胞构型, 采用 Materialise Magics 软件模拟不同点阵单胞构型、填充密度与热交换效率之间的关系, 优选出了具有较优热交换效率的点阵单胞构型。在此基础上, 按三种不同密度进行填充, 采用 Materialise Magics 软件分别计算点阵结构热交换面积。并按优选的点阵单胞构型、以三种不同密度对 316L 不锈钢粉末进行激光选区熔化的增材制造制备。采用微纳计算机断层扫描技术对制备成型后的点阵结构进行三维图形的重构, 获得该点阵结构的热交换面积。分别计算并对比热交换效率的数模预测值与实测值可知, 316L 不锈钢点阵结构热交换效率的数模预测值与实际测试值偏差约为 11%。

关键词 激光技术; 增材制造; 点阵结构; 热交换器; 结构优化

中图分类号 TG156

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1914006

Optimization and Laser Selective Melting for Lattice Structure of Heat Exchanger

Liang Jiayu*, Zhang Wenyang, Liu Wei, Chen Bingqing

3D Research and Engineering Technology Center, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China

Abstract The minimum characteristic size for 316L stainless steel was determined using a laser powder bed melting experiment of the lattice structure. Four types of lattice cell structures were designed. The relationship between different lattice cell configurations, packed density, and heat exchange efficiency was simulated by Materialise Magics software. A lattice cell configuration with a better heat exchange efficiency was selected. Three different densities with the best lattice cell configuration were filled, and Materialise Magics software calculated the heat exchange area of the three different densities of lattice structures. Laser powder bed melting additive manufacturing under three densities was used to fabricate a 316L stainless steel lattice structure. Computed tomography was used to reconstruct the three-dimensional image of the lattice structure, and the heat exchange area of the structure was determined. The heat exchange efficiency value was predicted using a mathematical model, and the measured value was calculated and compared. The difference between the mathematical model predicted and measured values of heat exchange efficiency of 316L stainless steel value is about 11%.

Key words laser technique; additive manufacturing; lattice structure; heat exchanger; structure optimization

1 引言

传统冷却系统中的热交换器一般采用列管式或板翅式结构, 其热交换效率较低, 质量也较大。如何有效提高换热器的热交换率, 是提升冷却系统综合性能的关键问题之一。点阵结构是三维 (3D) 有序多孔结构的一种, 由周期性的点阵桁架组成, 可以通过桁架的构型和几何尺寸设计实现其功能性的调控^[1]。由于具有

较高的比表面积, 点阵结构在热交换器中有较大的应用潜力^[2]。

近年来, 随着增材制造技术的发展成熟, 三维点阵结构的制造迎来了新的变革。由于是自下而上、逐点逐层制造, 增材制造消除了其在设计几何体时与可制造性相关的限制, 理论上可以制备任意复杂的几何构型^[3]。使用增材制造的工艺方法制造复杂的点阵结构并对其进行力学性能测试和研究逐渐成为国内外学者

收稿日期: 2021-08-19; 修回日期: 2021-09-23; 录用日期: 2021-10-19

通信作者: *893413869@qq.com

新的研究焦点^[3-5]。

除了点阵结构的力学特性外,其传热特性广受关注^[1]。Tian等^[6]综合运用数值模拟和试验分析方法,系统讨论了各类胞元构型下的金属二维和三维点阵结构的传热散热特性,认为除了结构构型和材料种类以外,加工工艺与制造质量也显著影响着微桁架点阵结构的传热特性,特别是桁架内部杆的表面粗糙度,直接影响微桁架结构的黏附系数,从而间接影响对流传热的效率。周期性微桁架点阵结构的热学性能已有大量学者进行了讨论^[1,7-10],国内的卢天健课题组采用边界函数传递方法建立起烧室热环境下主动冷却壁板热流固耦合共轭传热数值模型,对比讨论了槽道式主动冷却结构在传热性能和强度特性的不足之处,重点对3类典型胞元构型点阵夹层壁板的热结构响应进行了比较^[11-13]。结果显示,胞元构型对换热能力和结构强度有较大的影响,在相对密度较大、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,点阵夹层结构在飞机结构的耐热防热方面具有较大的优势^[1,11-13]。

增材制造点阵结构中的高密度散热通道不仅能有效提升构件的散热性能,也能在保证具有同等力学性能(强度,刚度)的条件下减轻构件自重,其作为散热-承载双功能的材料可以广泛应用于超声速飞机、宇宙飞船、发动机燃烧室衬套、高功率电子器件等的主动冷却^[5,14-16]。但是将增材制造与点阵结构深度融合从而充分发挥出各自优势仍是比较新的研究领域,在设计方法理论与制造工艺技术方面依然存在诸多挑战,如何准确表征尺度关联的点阵性能、增材制造材料各向异性和疲劳性能、功能梯度材料设计和增材制造工艺等均是当前的研究难点与热点问题^[2]。

随着世界范围内高精尖事业的快速发展,高端设备发热结构的散热问题及其具备的军事和商业价值,已令各军事大国纷纷投资该领域,并成为当前社会乃至未来世界前沿科技事业发展的一个主要方向。由于工程应用传统热交换器体积、质量较大,热交换效率偏低,无法满足高端设备的多功能一体化和轻量化等需求,因此,元器件逐渐向高紧凑度方向发展,使得内部发热结构的散热问题日渐突出。应用在航天器发热部件这一类高端设备的热负荷非常高,有时甚至可达1万千瓦,这对其结构的散热性能提出了更严苛的设计要求,除此之外,应用于特殊结构中的元器件还要保证具有质量轻便、承载能力强等特点。种种限制条件使得新型紧凑型热交换器的研究设计工作迫在眉睫,且其开发前景非常广阔^[17]。

由传热过程方程式或对流传热牛顿冷却公式可知,增加传热面积、传热温差以及传热系数,都可以实现增加传递的热量。在材质和传热温差不发生变化的情

况下,增加传热面积是一条可行的途径,也是增材制造可以方便快捷地实现的方法。根据Chadwick^[18]对于紧凑型热交换器的定义,换热面积与流道体积之比称为该侧传热面积密度,又称为比表面积 β , β 值大于 $700\text{ m}^2/\text{m}^3$ 的热交换器即可称为紧凑型热交换器。相同换热量条件下,紧凑型热交换器与传统的热交换器相比,空间占比更小,质量也更轻便,这些优点使得紧凑型热交换器拥有更低的制造和维护成本以及更好的综合性能。

本研究通过激光选区熔化试验确定了简单立方点阵结构的最小特征尺寸,数值模拟研究了不同点阵单胞构型、填充密度与热交换效率之间的关系,优选了具有较优热交换效率的点阵单胞构型。在较优点阵单胞构型的基础上,按不同密度进行填充,使用专业软件计算不同密度的点阵结构热交换面积。采用激光选区熔化技术实际增材制备了316L不锈钢不同密度的紧凑型点阵结构,并与理论预测的热交换效率进行了对比,为进一步研发和制备高性能热交换器奠定技术基础。

2 试验材料与方法

激光选区熔化成形点阵结构是在德国EOS制造的M290型激光选区熔化成形设备上进行的,成形最大尺寸为 $250\text{ mm}\times 250\text{ mm}\times 325\text{ mm}$,系统配备功率为400 W光纤激光器。该设备使用的分层设计软件为Magics软件,可实现分层、支撑设计和扫描轨迹一体化设计。点阵结构激光选区熔化成形用316L不锈钢合金粉末形貌如图1所示,激光选区熔化成形工艺参数如表1所示,点阵计算机断层扫描(CT)参数如表2所示,316L不锈钢合金粉末特性如表3所示。

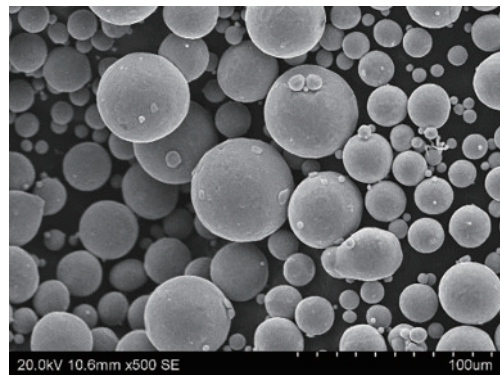


图1 点阵结构激光选区熔化成形用316L不锈钢合金粉末形貌

Fig. 1 Morphology of 316L stainless steel powder for laser selective melting of lattice structures

目前:制备金属材料晶格结构常用的增材制造方法有激光粉末床熔化和电子束粉末床熔法等;常用的材料有316L不锈钢、Ti6Al4V和铜合金;常用的晶格结构有四面体、金字塔形、八面体、3D-Kagome等多种构型^[19]。Wadley等^[20]讨论了热传导、摩擦流动损失和晶格拓扑结构之间的关系,认为在多孔结构中主要存

表 1 316L 不锈钢点阵结构激光选区熔化成形工艺参数

Table 1 Processing parameters of laser selective melting of 316L stainless steel lattice structures

Item	Parameter
Scanning strategy	Layered rotary scanning (angle between the layers 67°)
Laser power /W	285
Scanning speed / (mm·min ⁻¹)	960
Spot diameter /mm	0.08
Thickness /mm	0.04
Scanning interval /mm	0.1

表 2 316L 不锈钢点阵结构 CT 扫描参数

Table 2 CT scanning parameters of 316L stainless steel lattice structures

Item	Parameter
Tube voltage /kV	160
Tube current / μ A	100
Integral time /ms	334
Resolution ratio / μ m	10

在三种强制传热传递:1) 通过固体连杆的热传导;

表 3 点阵结构激光选区熔化成形用 316L 不锈钢粉末特性

Table 3 Properties of 316L stainless steel powder for laser selective melting of lattice structures

Item	Power property					
Chemical component /%	Standard: GB/T 20878 grades and chemical composition of stainless steel and heat resistant steel					
	Element	Standard	Measured	Element	Standard	Measured
	Fe	Bal.	Bal.	P	≤ 0.045	0.0110
	Cr	16~18	17.31	S	≤ 0.030	0.0070
	Ni	10~14	11.31	C	≤ 0.030	0.0110
	Mo	2~3	2.66	O	/	0.0560
	Mn	≤ 2.0	1.51	N	/	0.0835
	Si	≤ 1.0	0.62		/	/
Size distribution / μ m	Standard: GB/T 19077 laser diffraction method					
	D10		D50		D90	
	21.8		32.7		48.8	
Degree of sphericity /%	Image method					
	90.3					
Hall velocity / [s·(50 g) ⁻¹]	Standard: GB/T 1482 metallic powders-determination of fluidity					
	18					
Apparent density / (g·cm ⁻³)	Standard: GB/T 1479.1 funnel method					
	4.18					
Tap density / (g·cm ⁻³)	Standard: GB/T 5162 determination of tap density of metals					
	4.76					
Morphology	Gray, dry, and no visible inclusions					

3 结果与分析

3.1 点阵结构成形的最小特征尺寸

通过优化简单立方点阵结构的成形方向和支撑结

2) 通过空洞进行的热对流;3) 通过面板的热对流。其中,通过固体连杆的热传导是最主要的散热机制。Saltzman 等^[21]采用激光粉末床熔化增材制备了 AlSi10Mg 的晶格结构的热交换器,结果显示,相比传统方法制备的热交换器,其热交换效率提高了 14%。Yang 等^[22]采用数值模拟对比了 Kagome 晶格与四面体晶格两种晶格夹芯板热交换器的流体流动,认为 Kagome 晶格的散热效果更佳,其内部的中心顶点起到了涡流发生器的作用,不仅打乱了基本流动,而且引起了流动的静止和分离,复杂的流动行为同时加强了壁面和连杆的热传导。

点阵结构具有较大的表面积/体积比,使得其具备优异的热交换效率。本文的设计思路如下:1) 确定激光选区熔化点阵结构成形的最小特征尺寸;2) 针对四种不同的点阵单胞结构,模拟研究不同点阵单胞构型、尺寸与热交换效率之间的关系,优选具有较优热交换效率的点阵单胞构型;3) 针对上述较优构型,开展不同单胞尺寸填充的点阵结构热交换效率测试,通过计算机层析成像,对激光选区熔化成形的点阵结构进行三维图形重构,获得 316L 不锈钢激光选区熔化成形点阵结构的热交换效率。

构设计,采用激光选区熔化成形制备了如表 4 所示特征尺寸的简单立方点阵结构。

需要说明的是,采用激光选区熔化成形简单立方点阵结构之后,需要将设计、制备的成形辅助支撑通过机

表 4 简单立方点阵结构尺寸参数

Table 4 Size parameters of simple cubic lattice structures

Lattice type	Characteristic dimensions	
	Single cell size	Bar diameter / Face thickness / mm
Simple cubic	10 mm × 10 mm × 10 mm	0.1
		0.2
		0.3
		0.4
		0.5
		0.7
		0.1
	0.2	
	0.3	
	0.4	
	0.5	
	0.7	

械方法去除。但由于点阵结构为杆件,直径较小,在支撑去除过程中极易造成点阵结构的破坏。本文同时针对简单立方点阵结构,设计了齿状点接触的支撑形式,较好地解决了成形支撑结构和点阵结构的分离问题。激光选区熔化成形的简单立方点阵结构如图 2 所示。

从图 2 可以看出,当上下表面厚度为 0.1 mm,且点阵结构杆件的直径 < 0.3 mm 时,激光选区熔化成形点阵结构变形十分严重,部分出现了成形失败。进一步表明,激光选区熔化成形点阵结构的最小特征尺寸(包括上下表面的厚度以及杆件直径)为 0.3 mm。

3.2 点阵结构换热效率数值模拟及优化

本文设计了如图 3 所示的 4 种不同的点阵构型,这 4 种点阵结构的外形尺寸相同,将图 3 所示的 4 种点阵单元按照 1 × 1 × 1、2 × 2 × 2、4 × 4 × 4 和 8 × 8 × 8 的方式填充在 10 mm × 10 mm × 10 mm 的空间内,以图 3 (c) 所示的点阵结构为例,不同数量的点阵结构填充效果如图 4 所示。杆件直径均为 0.3 mm。

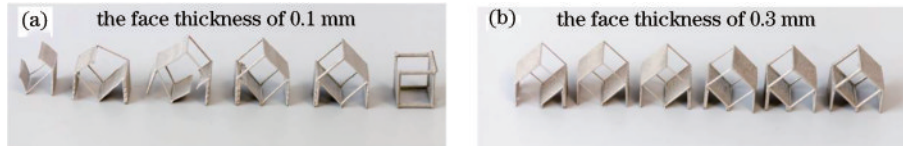


图 2 激光选区熔化成形不同特征尺寸的简单立方点阵。(a)面厚度为 0.1 mm; (b)面厚度为 0.3 mm
Fig. 2 Simple cubic lattice structures with different characteristic dimensions formed by laser selective melting.
(a) Face thickness is 0.1 mm; (b) face thickness is 0.3 mm

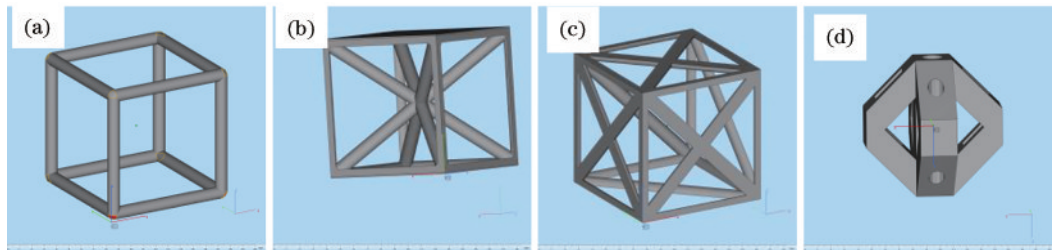


图 3 4 种不同的点阵单元结构。(a) 1 × 1 × 1; (b) 2 × 2 × 2; (c) 4 × 4 × 4; (d) 8 × 8 × 8
Fig. 3 Four different lattice unit cell structures. (a) 1 × 1 × 1; (b) 2 × 2 × 2; (c) 4 × 4 × 4; (d) 8 × 8 × 8

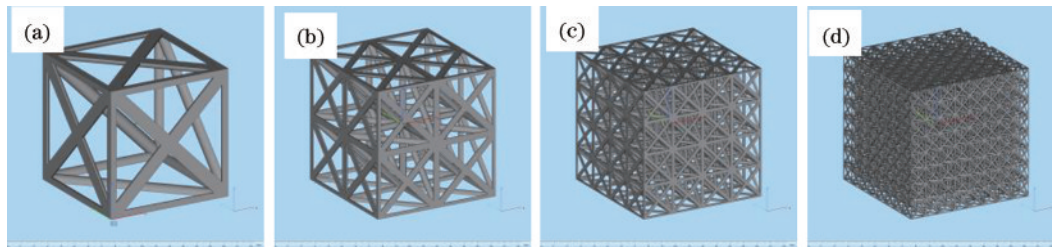


图 4 不同数量的点阵结构填充示意图。(a) 1 × 1 × 1; (b) 2 × 2 × 2; (c) 4 × 4 × 4; (d) 8 × 8 × 8
Fig. 4 Filling schematic diagrams with different numbers of lattice structures. (a) 1 × 1 × 1; (b) 2 × 2 × 2; (c) 4 × 4 × 4; (d) 8 × 8 × 8

相比于传统的管式或板翅式热交换结构,点阵结构具有较好的热交换效率,主要原因是其热交换面积较大,即具有较高的表面积和体积比,如图 5 所示。

如引言所述,在材质和传热温差不发生变化的情

况下,提高点阵结构热交换效率就是提高点阵结构在单位体积内的热交换面积,为此本文定义热交换效率公式为

$$H_e = A_s / V_a, \quad (1)$$

式中: H_e 是结构的热交换效率; A_s 是结构的表面积; V_a

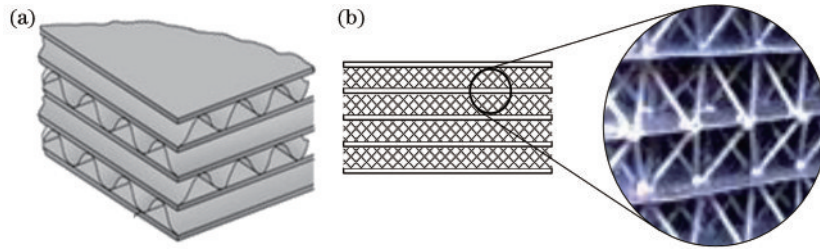


图 5 热交换结构对比。(a)传统板翅式热交换结构;(b)点阵热交换结构

Fig. 5 Comparison of heat exchange structure. (a) Traditional plate-fin heat exchange structure; (b) lattice heat exchange structure

是结构的表观体积,即包括结构本身的体积和结构内的空腔。

采用Materialise Magics 软件计算上述 4 种不同构型和不同尺寸的点阵结构的表面积,再采用式(1)计算

热交换效率,图 3 所示的 4 种不同的点阵构型[Type 1 对应图 3(a), Type 2 对应图 3(b), Type 3 对应图 3(c), Type 4 对应图 3(d)]的热交换效率随点阵填充数量的变化如表 5 所示。

表 5 不同构型和密度的点阵结构热交换效率

Table 5 Heat exchange efficiency of lattice structures with different configurations and densities

Numbers of lattice structures	Heat exchange efficiency / (m ² ·m ⁻³)			
	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4
1×1×1	496.876	542.323	546.953	532.368
2×2×2	731.252	911.883	842.897	1030.399
4×4×4	1200.006	1694.732	1441.238	2025.871
8×8×8	2137.569	3297.603	2579.403	3991.598

由表 5 和图 6 可知,在 4 种点阵结构中,Type 4 型点阵结构的热交换效率随点阵填充数量的增长最快,其在 10 mm×10 mm×10 mm 的范围内填充 8×8×8 的点阵数量,其热交换效率可达到 3991.598 m²/m³,远大于 Chadwick^[18]对于紧凑型热交换器的定义:换热面积与流道体积之比大于 700 m²/m³的热交换器即可称为紧凑型热交换器。

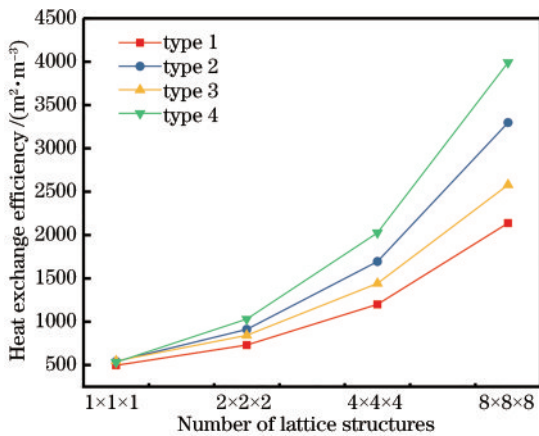


图 6 热交换效率随点阵结构构型和密度的变化

Fig. 6 Variation of heat exchange efficiency with lattice configuration and density

通过对点阵结构热交换效率进行数值模拟和优化,本文优选出如图 7 所示的点阵单胞结构。

3.3 点阵结构热交换效率模拟值与实测值对比及其激光选区熔化制备

本文采用图 7 所示点阵构型,在 20 mm×20 mm×

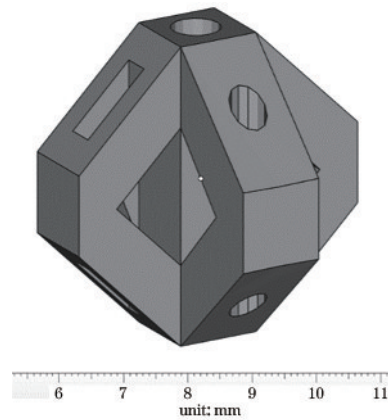


图 7 具有较高热交换效率的点阵单胞结构

Fig. 7 Lattice unit cell structure with high heat exchange efficiency

20 mm 的空间范围内,分别填充单胞外形尺寸 8 mm×8 mm×8 mm (构型 1,填充 22.5 个单胞,杆件直径约为 2 mm)、5 mm×5 mm×5 mm (构型 2,填充 64 个单胞,杆件直径约为 1.25 mm)和 4 mm×4 mm×4 mm (构型 3,填充 125 个单胞,杆件直径约为 1 mm)的点阵结构,其填充效果如图 8 所示。

采用Materialise Magics 软件计算了上述三种不同密度的点阵结构热交换面积分别为 5358.4 mm²、8154.84 mm²和 10161.184 mm²。采用激光选区熔化按三种不同密度实际制备了 316L 不锈钢点阵如图 9 所示。

采用微纳 CT 扫描技术对激光选区熔化成形的点阵结构三维图形进行重构,获得该点阵结构的热交换

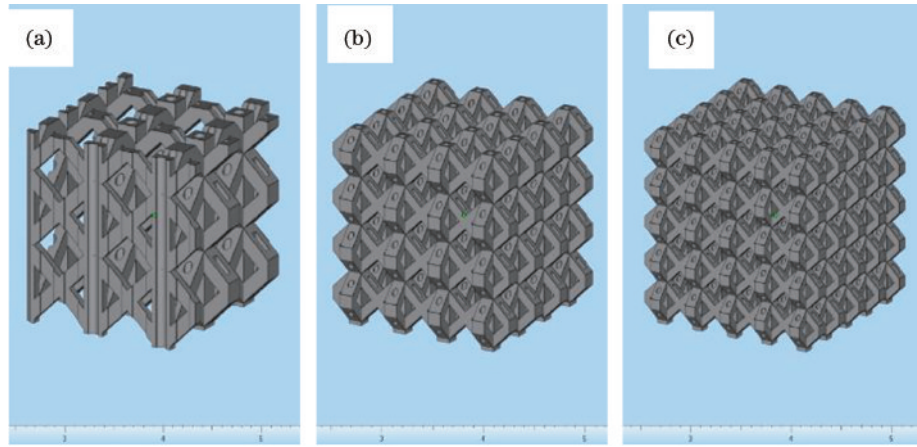


图 8 不同密度的点阵结构模型。(a) $8\text{ mm} \times 8\text{ mm} \times 8\text{ mm}$; (b) $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$; (c) $4\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$

Fig. 8 Lattice structure models with different densities. (a) $8\text{ mm} \times 8\text{ mm} \times 8\text{ mm}$; (b) $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$; (c) $4\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$

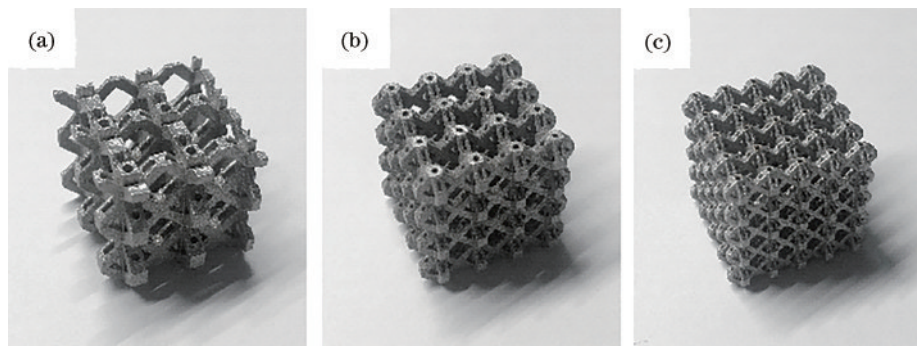


图 9 激光选区熔化成形 316L 不锈钢点阵结构。(a) $8\text{ mm} \times 8\text{ mm} \times 8\text{ mm}$; (b) $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$; (c) $4\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$

Fig. 9 316L stainless steel lattice structures formed by laser selective melting. (a) $8\text{ mm} \times 8\text{ mm} \times 8\text{ mm}$; (b) $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$; (c) $4\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$

面积,如图 10 所示。热交换面积 CT 计算结果如表 6 所示,点阵结构热交换效率模拟值与 CT 测量值对比如表 7 所示。

316L 不锈钢在较高密度填充时的误差约为 11%,这主要归因于 316L 不锈钢点阵结构的表面粗糙度略

大,在较高密度填充时,成形后点阵结构的表面粗糙度变大,在一定程度上增加了内表面积,即换热面积,同时迟滞了在内表面附近热介质的流动速度,因此实际上增加了换热效率。

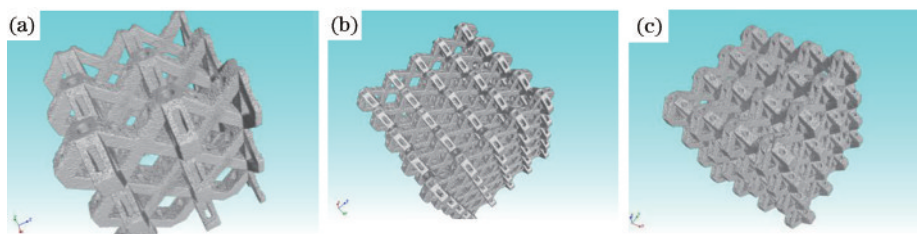


图 10 316L 不锈钢点阵结构 CT 三维成像图。(a) $8\text{ mm} \times 8\text{ mm} \times 8\text{ mm}$; (b) $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$; (c) $4\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$

Fig. 10 CT 3D images of 316L stainless steel lattice structures formed by laser selective melting. (a) $8\text{ mm} \times 8\text{ mm} \times 8\text{ mm}$; (b) $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$; (c) $4\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$

表 6 316L 点阵结构热交换面积 CT 测试结果

Table 6 CT test results of heat exchange surface of 316L lattice structures

Material	Configuration	Heat exchange surface / mm^2
316L stainless steel	Configuration (1)	5437
	Configuration (2)	9120
	Configuration (3)	11321

表 7 点阵结构热交换效率模拟值与 CT 测量值对比

Table 7 Comparison of simulation values and CT test results of heat exchange efficiency of lattice structures

Material	Configuration	Simulation value / (m ² ·m ⁻³)	CT test results / (m ² ·m ⁻³)	Deviation / %
316L stainless steel	Configuration (1)	669.800	679.600	1.5
	Configuration (2)	1019.355	1140.000	11.8
	Configuration (3)	1270.148	1415.125	11.4

4 结 论

本文通过试验获得 316L 不锈钢激光选区熔化成形点阵结构的最小特征尺寸为 0.3 mm。通过 Materialise Magics 软件优选出了具有较高换热效率的点阵结构单胞,并建立了点阵结构热交换效率的数值模型。通过 CT 扫描技术对点阵结构热交换效率进行了测试,由对比分析结果可知:在低密度填充时,316L 不锈钢点阵结构热交换效率的数值预测值与实际测试值接近;而在较高填充密度时,316L 不锈钢点阵结构热交换效率的数值预测值与实际测试值偏差约为 11%。这是由于表面粗糙度变差,热面积增加,同时迟滞了换热介质的流动速度。

参 考 文 献

- [1] 王向明, 苏亚东, 吴斌, 等. 微桁架点阵结构在飞机结构/功能一体化中的应用[J]. 航空制造技术, 2018, 61(10): 16-25.
Wang X M, Su Y D, Wu B, et al. Application for additive manufacturing of lattice materials on integrated aircraft structures and functions[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(10): 16-25.
- [2] 朱继宏, 周涵, 王创, 等. 面向增材制造的拓扑优化技术发展现状与未来[J]. 航空制造技术, 2020, 63(10): 24-38.
Zhu J H, Zhou H, Wang C, et al. Status and future of topology optimization for additive manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(10): 24-38.
- [3] Cheng L, Liu J K, Liang X, et al. Coupling lattice structure topology optimization with design-dependent feature evolution for additive manufactured heat conduction design[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2018, 332: 408-439.
- [4] 郑权, 冀宾, 李昊, 等. 基于增材制造的多层金字塔点阵夹芯板抗压性能[J]. 航空材料学报, 2018, 38(3): 77-82.
Zheng Q, Ji B, Li H, et al. Compressive behavior of sandwich panels with multilayer pyramidal truss cores by additive manufacturing[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2018, 38(3): 77-82.
- [5] 张南. 增材制造含流道微桁架夹层壁板热-力性能分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
Zhang N. Thermo-mechanical performance of micro-truss sandwiched panel with flow channels made by 3D printing [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Kim T. Fluid-flow and heat-transfer in a lattice-frame material[D]. Cambridge: University of Cambridge, 2004.
- [9] Kim T, Hodson H P, Lu T J. Fluid-flow and end wall heat-transfer characteristics of an ultralight lattice-frame material[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47(6/7): 1129-1140.
- [10] Kim T, Hodson H P, Lu T J. Pressure loss and heat transfer mechanisms in a lattice-frame structured heat exchanger[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2004, 218(11): 1321-1336.
- [11] 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 and Mass Transfer, 2005, 48(19/20): 4243-4264.
- [12] Wen T, Tian J, Lu T J, et al. Forced convection in metallic honeycomb structures[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006, 49(19/20): 3313-3324.
- [13] 罗树坤, 宋宏伟, 黄晨光, 等. 轻质点阵主动冷却壁板热流固耦合响应分析[J]. 强度与环境, 2012, 39(2): 31-40.
Luo S K, Song H W, Huang C G, et al. Thermal-fluid-solid coupling analysis of light-weight actively cooled panel with lattice-framed material[J]. Structure & Environment Engineering, 2012, 39(2): 31-40.
- [14] Lundgren J, Klarbring A, Lundgren J E, et al. Topology optimization of periodic 3D heat transfer problems with 2D design[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2019, 60(6): 2295-2303.
- [15] Wu S H, Zhang Y C, Liu S T. Topology optimization for minimizing the maximum temperature of transient heat conduction structure[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2019, 60(1): 69-82.
- [16] Guo K, Qi W Z, Liu B T, et al. Optimization of an "area to point" heat conduction problem[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 93: 61-71.
- [17] 金利腾. 桁架结构热交换器流动与传热实验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
Jin L T. Experimental study on flow and heat transfer of truss structure heat exchanger[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [18] Chadwick S S. Ullmann's encyclopedia of industrial

- chemistry[J]. Reference Services Review, 1988, 16(4): 31-34.
- [19] Helou M, Kara S. Design, analysis and manufacturing of lattice structures: an overview[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2018, 31(3): 243-261.
- [20] Wadley H N G, Queheillalt D T. Thermal applications of cellular lattice structures[J]. Materials Science Forum, 2007, 539/540/541/542/543: 242-247.
- [21] Saltzman D, Bichnevicius M, Lynch S, et al. Design and evaluation of an additively manufactured aircraft heat exchanger[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 138: 254-263.
- [22] Yang G, Hou C, Zhao M, et al. Comparison of convective heat transfer for Kagome and tetrahedral truss-cored lattice sandwich panels[J]. Scientific Reports, 2019, 9: 3731.