

点阵结构热交换器激光增材制造及换热性能测定

梁家誉*, 张文扬, 刘伟, 陈冰清

中国航发北京航空材料研究院焊接与塑性成形研究所, 北京 100095

摘要 采用激光粉末床熔化成形增材制造技术制备了具有点阵结构的 316L 不锈钢、TC4 钛合金和铜合金三种不同材料的热交换器。采用微纳计算机断层扫描(CT)技术对制备成形后的点阵结构热交换器进行三维图形的重构, 获得热交换面积的数值; 测量了激光粉末床熔化成形的点阵结构热交换芯体的尺寸及表面粗糙度; 使用由加热单元、流动水和热电偶组成的试验装置(水流量为 0.5 L/min, 入水口温度恒定为 22 °C, 环境温度为 25 °C, 加热单元的加热功率维持在 400 W), 对热交换器的换热性能进行了测定。测试结果如下: 三种材料的热交换芯体尺寸均达到了 150 mm × 150 mm, 尺寸精度控制在 ±0.1 mm, 表面粗糙度(R_a) 小于 10 μm , 热交换效率 > 1000 m^2/m^3 。相比传统的具有相同芯体尺寸的热交换效率为 875 m^2/m^3 的板翅式热交换结构, 三种材料的点阵热交换结构(具有相同点阵结构、尺寸、结构表面积和结构表现体积, 未考虑材料的热物性参数)在热交换效率提高 10% 的情况下, 体积减小了 24.9%, 质量减少了 66.6%。

关键词 激光技术; 增材制造; 点阵结构; 热交换器; 热交换性能

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL220657

1 引言

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]。热交换器散热率更高及结构化和轻量化的迫切需求推动了点阵结构散热器的快速发展^[3]。

近年来增材制造技术的发展为三维点阵结构的制造带来新的变革。增材制造技术采用自下而上、逐点逐层制造方法, 消除了传统制造技术在设计几何体时的限制, 理论上可以制备任意复杂的几何构型^[4]。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化等; 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^[5]。

增材制造点阵结构中的高密度散热通道不仅能有效提高构件的散热性能, 还能在相同力学性能(强度和刚度)条件下减轻构件自重, 具有散热-承载双功能的材料被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^[6-9]。

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。Wadley 等^[10]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在三种强制传热传递方式: 1) 通过固体连杆进

行热传导; 2) 通过空洞进行热对流; 3) 通过面板进行热对流。其中, 通过固体连杆进行热传导是最主要的散热机制。Saltzman 等^[11]采用激光粉末床熔化增材制造技术制备了 AlSi10Mg 晶格结构的热交换器, 结果显示, 与传统方法制备的热交换器相比, 热交换效率提高了 14%。Yang 等^[12]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, 还引起了介质的静止和分离, 复杂的流动行为同时加强了壁面和连杆的热传导。王亚青等^[13]采用数值正交方法对微槽道散热器的性能进行了优化。Lu 等^[14-16]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方面的不足, 重点对三类典型胞元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, 较大相对密度、较小截面尺寸、较高流速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, 应用于飞机结构中的点阵夹层结构在耐热隔热方面都具有较大的优势^[1]。李时春等^[17]综述了激光增材制造多层结构成形件的微观组织结构特征, 总结了其微观组织结构特征演变的影响因素。葛禄成

收稿日期: 2022-03-11; 修回日期: 2022-04-12; 录用日期: 2022-05-26; 网络首发日期: 2022-06-03

通信作者: *893413869@qq.com

等^[18]讨论了铝含量对激光增材制造 TC4 合金组织及性能的调控作用。

但是,将增材制造与点阵结构进行深度融合是比较新的研究领域,在设计方法与制造工艺方面依然存在诸多挑战,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及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]。由于涉及很多的工艺参数,目前也没有专门的标准来评价增材制造点阵结构的热交换器的性能^[19]。

本文以 Kagome 晶格为基础,首先通过试验对晶格的尺寸进行了优化,以 TC4 合金粉末为原料,采用激光粉末床熔融增材技术制备了具有点阵结构的热交换器芯体,在热交换效率大致相同的情况下,与传统板翅式热交换器进行了体积和质量的对比,证明了点阵结构热交换器的先进性。进一步采用激光粉末床熔融增材技术制备了具有相同点阵结构的 316L 不锈钢、TC4 钛合金和铜合金三种不同材料的热交换器,获得了不同材料热交换器的尺寸精度和表面粗糙度数据,并采用自行研制的装置对点阵结构热交换器的热交换性能进行了测定。该工作为进一步研发和制备高性能热交换器提供了技术参考。

2 试验方法与材料

激光粉末床熔化成形点阵结构试验在激光粉末床熔化成形设备上进行。设备成形最大尺寸为 250 mm × 250 mm × 325 mm,系统配备 400 W 光纤激光器。该设备使用的 Magics 软件,可实现分层、支承设计和扫描轨迹一体化设计。不锈钢合金粉末粒径分布数为 10% 时所对应的粒径为 21.80 μm,中值粒径为 32.07 μm,不锈钢合金粉末粒径分布数为 90% 时所对应的粒径为 48.80 μm;钛合金粉末粒径分布数为 10% 时所对应的粒径为 12.52 μm,中值粒径为 29.39 μm,钛合金粉末粒径分布数为 90% 时所对应的粒径为 50.11 μm;铜合金粉末粒径分布数为 10% 时所对应的粒径为 14.48 μm,中值粒径为 30.72 μm,铜合金粉末粒径分布数为 90% 时所对应的粒径为 59.04 μm。不锈钢合金粉末、钛合金粉末和铜合金粉末的流速分别为 50 g/18 s、50 g/34.7 s 以及 50 g/30.6 s。不锈钢合金粉末、钛合金粉末和铜合金粉末的松装密度分别为 4.18 g/cm³、2.36 g/cm³ 以及 4.63 g/cm³。不锈钢合金粉末、钛合金粉末和铜合金粉末的振实密度分别为 4.76 g/cm³、2.78 g/cm³ 以及 5.51 g/cm³。

点阵结构具有较好的热交换效率,这是由于其具有较大的热交换面积,即具有较高的表面积和体积比。因此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。热交换效率公式为

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

式中: H_e 是结构的热交换效率; A_s 是结构的表面积; V_s 是结构的表观体积,即包括结构本身的体积和结构内

的空腔体积。

但是,以式(1)进行评估时未综合考虑热物性参数(如表面状态和热导率等)的影响,因此结果仍然是初步的。

3 分析与讨论

3.1 晶格结构热交换器的制备

在确认了粉末特性的基础之上,针对 TC4 钛合金、316L 不锈钢和 B30 铜合金三种合金开展了激光选区熔化成形的工艺参数研究,对不同参数下成形的合金试样进行了金相检验,观察分析了其内部冶金情况。选择成形良好的工艺参数作为优选的激光工艺参数,优化的激光粉末床熔化成形参数如表 1 所示。可以看出,三种材料的激光光斑直径相同,每层扫描的厚度相同,但是扫描间距不同,这是根据三种材料的具体成形情况而作出的微调。点阵计算机断层扫描(CT)参数如表 2 所示。

表 1 不同材料的点阵结构的激光粉末床熔化成形工艺参数
Table 1 Laser powder bed melting process parameters for lattice structures of different materials

Parameter	316L stainless steel	TC4 alloy	B30 alloy
Scanning strategy	Angle between layers is 67°		
Laser power /W	285	340	242
Scanning speed /(mm/min)	960	1250	600
Spot diameter /mm	0.08	0.08	0.08
Thickness /mm	0.04	0.04	0.04
Scanning interval /mm	0.10	0.12	0.08

表 2 316L 点阵结构的 CT 参数
Table 2 CT parameters of 316L lattice structure

Parameter	Value
Tube voltage /kV	160
Tube current /μA	100
Integral time /ms	334
Resolution ratio /μm	10

利用表 1 所示的激光粉末床熔化成形参数对三种材料分别进行制备,试件的金相组织如图 1 所示。可以看出,试样内部的气孔很少(相比较而言,B30 铜合金缺陷略多),组织均匀细密,致密度较高,具备较好的材料性能。

本文研究了点阵结构激光选区熔化成形的临界成形角度,结果表明:当成形角度为 45° 时,激光选区熔化成形制件的尺寸保持较好,下表面成形完好,未出现较明显的缺损现象。

基于上述激光选区熔化成形工艺研究,以 TC4 钛合金的交叉支柱点阵和简单立方点阵为对象,开展了典型点阵结构单胞的激光选区熔化成形试验研究,分



图 1 不同材料制备的试件的金相组织。(a) TC4 合金; (b) 316L 不锈钢; (c) B30 合金

Fig. 1 Metallographic structures of specimens prepared by different materials. (a) TC4 alloy; (b) 316L stainless steel; (c) B30 alloy

别设计并制备了 14 种具有不同杆件尺寸和面尺寸的交叉支柱点阵和简单立方点阵结构。结果表明:当上、下表面的距离为 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,确定激光选区熔化成形点阵结构的最小特征尺寸为 0.3 mm。对点阵结构激光选区熔化成形工艺进行了验证,实现了不同结构类型、不同密度点阵结构的“净成形”。

试验以 Kagome 晶格为基础,优化后的点阵单胞示意图如图 2 所示。

在 20 mm × 20 mm × 20 mm 的空间范围内,用尺寸为 4 mm × 4 mm × 4 mm 的单胞进行填充,热交换面积可达到 10161.184 mm²。对点阵结构进行微纳 CT 三维成像,如图 3 所示。热交换效率的模拟值、CT 测

量值及偏差如表 3 所示。

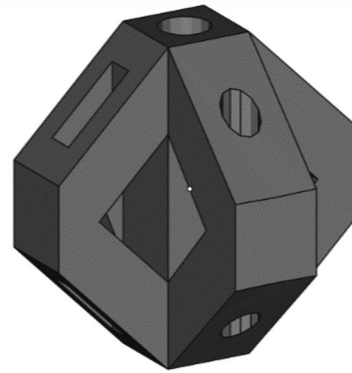


图 2 点阵单胞示意图

Fig. 2 Schematic of lattice unit cell

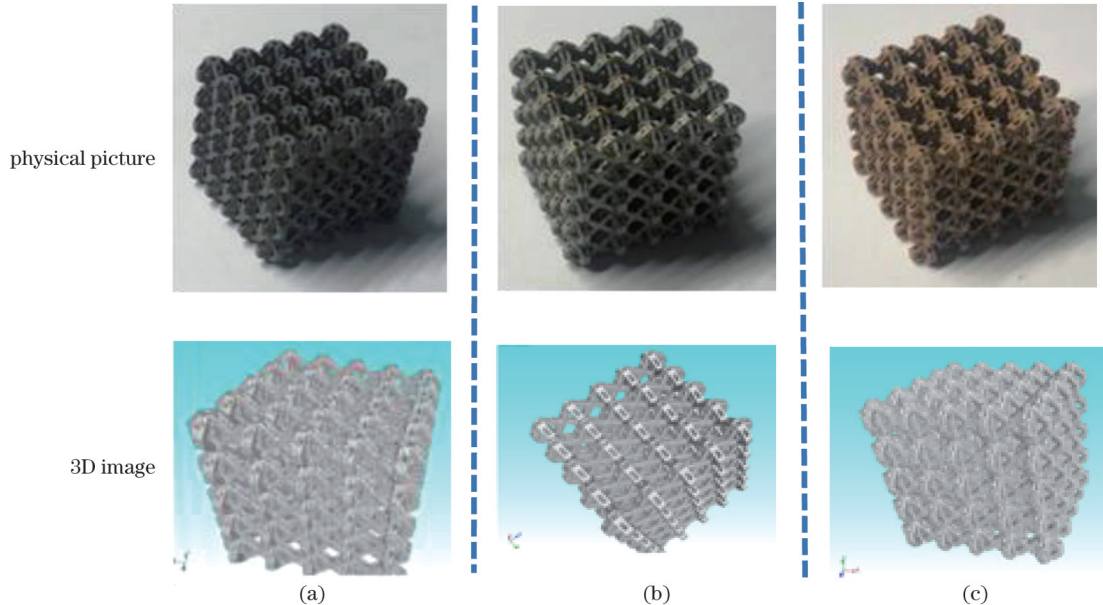


图 3 不同材料的点阵结构及其微纳 CT 三维成像图。(a) TC4 合金; (b) 316L 不锈钢; (c) B30 合金

Fig. 3 Lattice structures of different materials and their micro-nano CT 3D images. (a) TC4 alloy; (b) 316L stainless steel; (c) B30 alloy

表 3 不同材料点阵结构的热交换率

Table 3 Heat exchange efficiencies of different material lattice structures

Parameter	TC4 alloy	316L stainless steel	B30 alloy
Simulated heat exchange efficiency / (m ² /m ³)	1270.1	1270.1	1270.1
Measured heat exchange efficiency / (m ² /m ³)	1263.1	1415.1	1491.0
Deviation / %	-0.6	11.4	17.4

由于单胞尺寸以及填充密度相同,因此三种材料的热交换效率的模拟值是相同的,但是微纳 CT 三维成像的实测值是不同的。可以看出,TC4 合金热交换效率的模拟值和实测值之间的偏差最小。热交换效率的模拟值和实际值之间的偏差主要是打印所获得的实际值和数模之间的差异所致。由于 TC4 是目前激光选区熔化成形最为成熟的材料,其材料本身的激光选区熔化成形适应性良好,因此其打印件与数模最为接近。而对于 B30 铜合金,铜合金对激光的高反射率、高导热性等因素使其激光增材制造构件和数模的差异较大。316L 的情况介于 TC4 合金和铜合金之间。

对激光粉末床熔化成形制备的点阵结构热交换芯

体进行 CT 检测,如图 4 所示。316L 不锈钢点阵结构无未熔合、裂纹等缺陷,合金中的主要冶金缺陷为尺寸 $<100 \mu\text{m}$ 的气孔,如图 4(a)所示;TC4 合金点阵结构无残留粉末,未发现未熔合、裂纹等缺陷,合金中的主要冶金缺陷为尺寸为 $65 \sim 75 \mu\text{m}$ 的微小气孔,如图 4(b)所示;B30 铜合金点阵结构中的主要缺陷仍为内部的微小气孔,但当点阵密度较大时,结构的缺陷尺寸也较大,部分缺陷尺寸超过了 $100 \mu\text{m}$,如图 4(c)所示。相比于不锈钢、钛合金,铜及铜合金具有较低的激光吸收率和较高的热导率,在激光选区熔化成形时往往会导致热量的大量散失以及粉末的不充分熔化,从而样品缺陷较多。

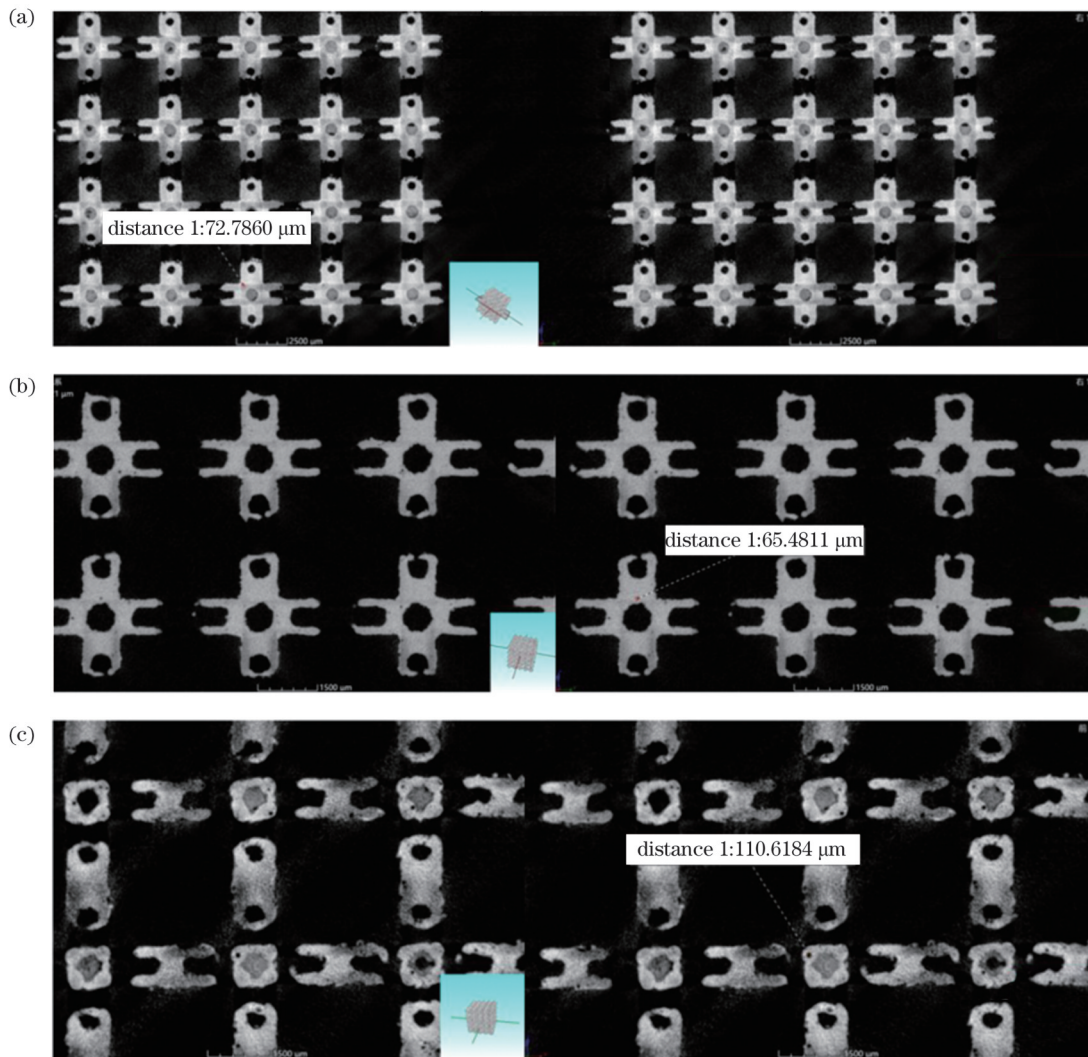


图 4 不同材料点阵结构的微纳 CT 无损检测结果。(a) 316L 不锈钢;(b) TC4 合金;(c) B30 合金

Fig.4 Micro-nano CT nondestructive test results of different material lattice structures. (a) 316L stainless steel;(b) TC4 alloy;(c) B30 alloy

3.2 点阵结构热交换芯体与传统结构热交换芯体的质量及体积对比

在传统热交换器中,板翅式结构的热交换效率最高,其结构示意图如图 5 所示,主要由隔板和翅片组成,材料一般为 316L 不锈钢。

设计的传统板翅式热交换芯体如图 6 所示,该热

交换芯体的截面尺寸为 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$,高为 40 mm ,总体积为 900 cm^3 ,其热交换面积为 787674.86 mm^2 ,热交换效率为 $875 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 。

为验证点阵热交换结构的先进性,本文通过制备 TC4 材料的热交换器,研究了热交换效率均大于 $875 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 的板翅式热交换结构和点阵热交换结构在

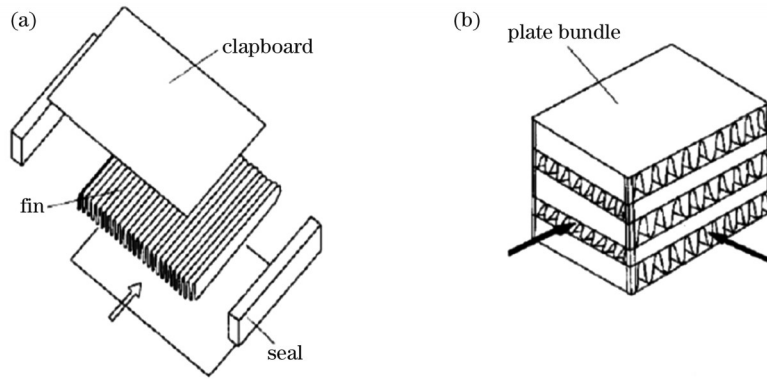


图 5 标准板翅式热交换器的结构示意图。(a)拆分示意图;(b)组装示意图

Fig.5 Structural diagrams of standard plate-fin heat exchanger. (a) Schematic of splitting; (b) schematic diagram of assembly

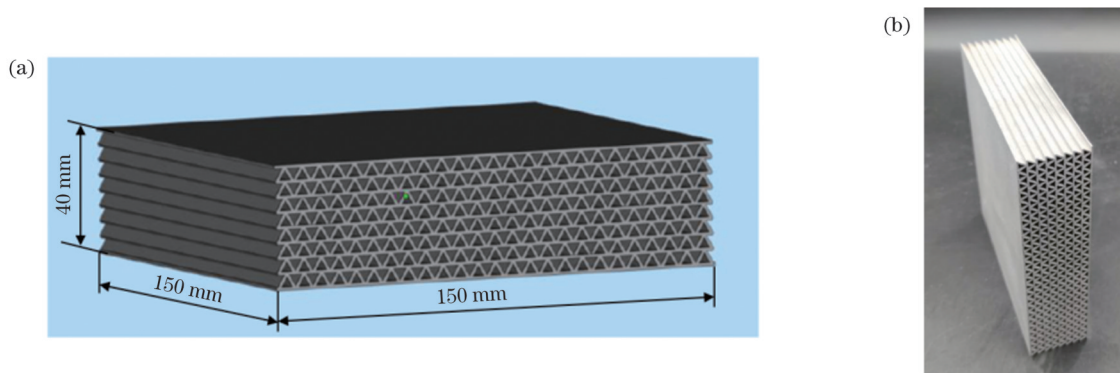


图 6 传统板翅式热交换芯体。(a)模型;(b)激光粉末床熔化成形件

Fig.6 Conventional plate-fin heat exchanger core. (a) Model; (b) part formed by laser powder bed melting

体积、质量以及热交换效率方面的区别。采用激光粉末床熔化成形技术制备上述传统板翅式结构热交换芯体,如图 6(b)所示;设计的热交换效率大于 $875 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 的点阵结构热交换芯体如图 7(a)所示,设计的点阵结构热交换芯体截面尺寸为 $130 \text{ mm} \times 130 \text{ mm}$,高度为 40 mm ,

总体积为 676 cm^3 ,通过 MaterialiseMagics 软件计算其热交换面积为 651225.169 mm^2 ,热交换效率为 $963 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 。相比传统板翅式结构热交换芯体,点阵结构热交换芯体体积减小了 24.8% 。采用激光粉末床熔化成形技术制备了点阵结构热交换芯体,如图 7(b)所示。

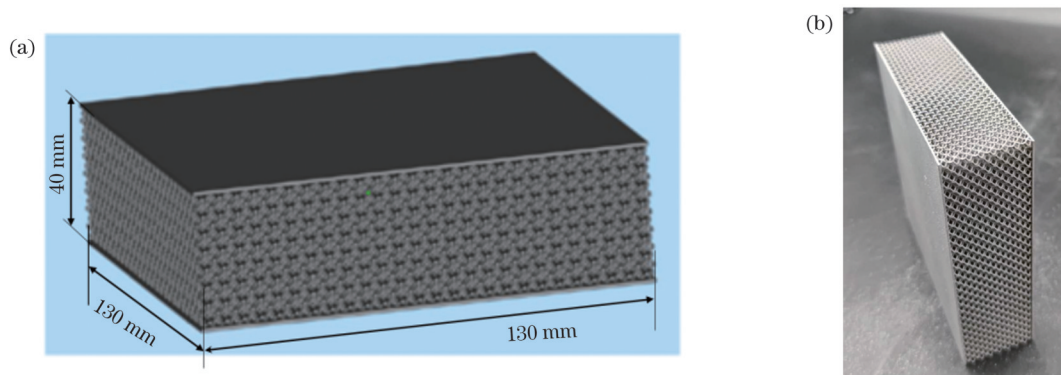


图 7 点阵结构热交换芯体。(a)模型;(b)激光粉末床熔化成形件

Fig.7 Heat exchanger core with lattice structure. (a) Model; (b) part formed by laser powder bed melting

表 4 列出了传统板翅式结构热交换芯体和点阵结构热交换芯体的质量和体积的测试结果。

由表 4 可知,相比热交换效率为 $875 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 的板翅式热交换结构,点阵热交换结构在热交换效率提高 10% 的情况下,其体积减小 24.9% ,质量减小 66.6% 。

因此,不失一般性,相比于传统的板翅式结构,点阵结构热交换器在提高热交换效率、减小体积以及减小质量方面都具有优势。

为提高激光选区熔化成形点阵结构的表面质量,试验采用了后续的喷砂处理,以改善点阵结构热交换器芯

表 4 传统板式结构热交换器和 TC4 合金点阵结构热交换器的对比

Table 4 Comparison of conventional plate-fin heat exchanger and TC4 alloy lattice structure heat exchanger

Parameter	Plate-fin structure	Lattice structure	Deviation / %
Heat exchange efficiency / (m ² /m ³)	875	963	+10.1
Volume /cm ³	900	676	-24.9
Mass /g	1870.1	624.7	-66.6

体的表面质量。对比激光选区熔化成形 TC4 钛合金试样在喷砂前、后的表面形貌,如图 8 所示,可以看出,直接激光选区熔化成形 TC4 钛合金表面比较平整,但仍可观察到激光扫描留下的凹凸痕迹[图 8(a)];经过喷砂处理后,钛合金试样的表面粗糙度变小,已经几乎观察不

到激光扫描在试样表层留下的痕迹[图 8(b)]。

3.2.1 316L 不锈钢点阵结构热交换芯体的高精度制备

依据图 9(a)所示点阵结构热交换芯体模型,采用激光粉末床熔化成形技术制备 316L 不锈钢点阵结构热交换芯体,外形尺寸为 150 mm×150 mm×21 mm,如图 9(b)所示。

通过 MaterialiseMagics 软件计算可知,该 316L 不锈钢点阵结构热交换芯体的表面积达到 565364.86 mm²,计算得到该点阵结构热交换芯体的热交换效率为 1196.5 m²/m³。

对该不锈钢点阵结构热交换芯体的尺寸精度和表面粗糙度进行了测试,测试结果如表 5 所示。

由表 5 可知,激光粉末床熔化成形技术制备的点阵结构热交换芯体的厚度尺寸偏差为 0.05 mm,截面尺寸为 149.94 mm×150.02 mm,尺寸精度优于

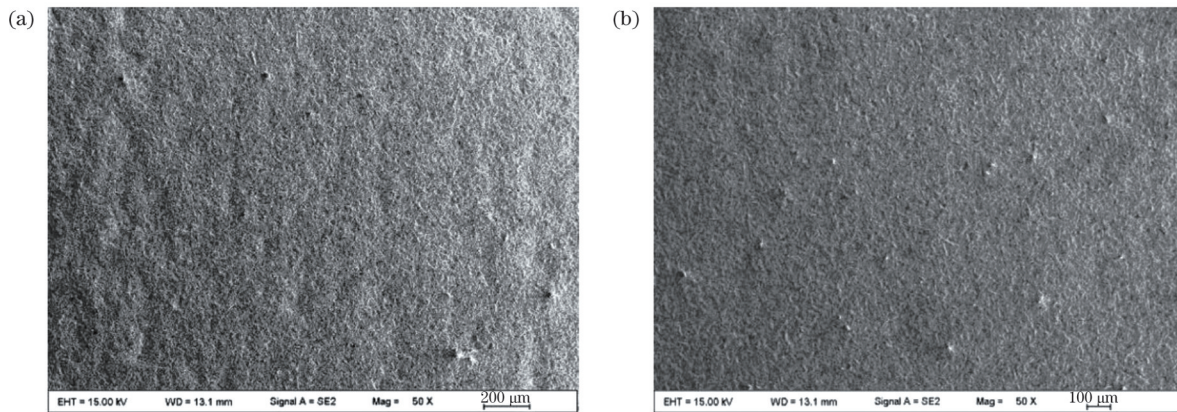


图 8 激光选区熔化成形件在喷砂前、后的表面形貌对比。(a)喷砂前;(b)喷砂后

Fig. 8 Comparison of surface morphology of laser selective melting part before and after sandblasting. (a) Before sandblasting; (b) after sandblasting

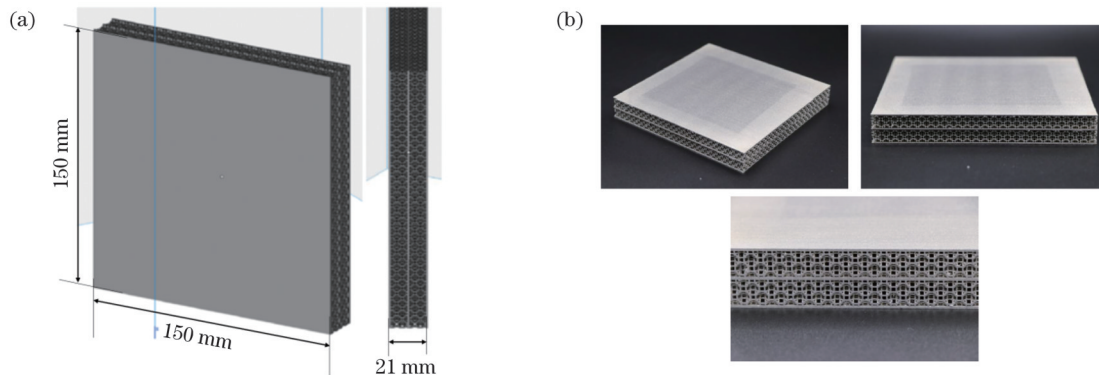


图 9 316L 不锈钢点阵结构热交换芯体。(a)模型;(b)激光粉末床熔化成形件

Fig.9 316L stainless lattice structure heat exchanger core. (a) Model; (b) part formed by laser powder bed melting

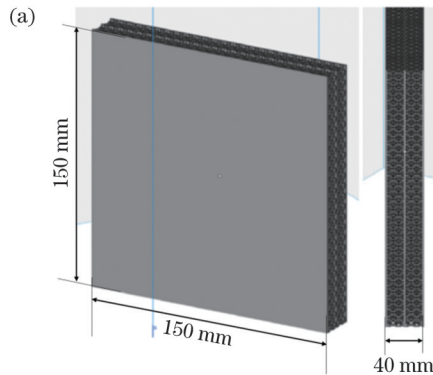
表 5 316L 不锈钢点阵结构热交换芯体的尺寸、表面粗糙度和尺寸精度

Table 5 Size, surface roughness, dimensional accuracy of 316L stainless lattice structure heat exchanger core

Parameter	Designed value	Measured value	Deviation /mm
Length /mm	150	149.94	-0.03
Width /mm	150	150.02	+0.02
Height /mm	21	20.95	-0.05
Average surface roughness /μm		2.35	

±0.1 mm。

对点阵结构热交换芯体不同位置的表面粗糙度 (R_a) 进行了测试, 结果分别为 2.7、1.9、2.1、2.7 μm , 平均表面粗糙度为 2.35 μm 。



3.2.2 TC4点阵结构热交换芯体的高精度制备

采用激光粉末床熔化成形技术制备 TC4 钛合金点阵结构热交换芯体, 外形尺寸为 150 mm × 150 mm × 40 mm, 如图 10 所示。

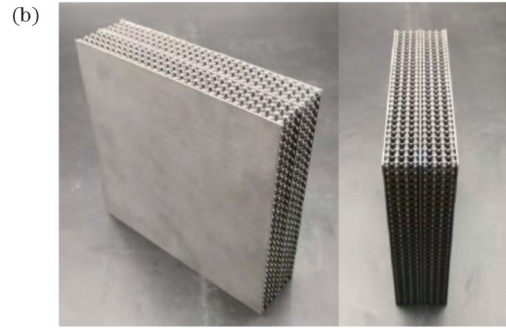


图 10 激光粉末床熔化成形 TC4 合金点阵结构热交换器。(a)模型;(b)实物图

Fig.10 TC4 alloy lattice structure heat exchanger formed by laser powder bed melting. (a) Model; (b) physical picture

通过 MaterialiseMagics 软件计算可知, 该 TC4 钛合金点阵结构热交换器的表面积达到 995450.991 mm^2 , 计算得到该点阵结构热交换芯体的热交换效率为

1106.1 m^2/m^3 。

测量 TC4 钛合金点阵结构热交换芯体的尺寸、表面粗糙度和尺寸精度, 结果如表 6 所示。

表 6 TC4 点阵结构热交换芯体的尺寸、表面粗糙度和尺寸精度

Table 6 Size, surface roughness, dimensional accuracy of TC4 alloy lattice structure heat exchanger core

Parameter	Designed value	Measured value	Deviation / mm
Length /mm	150	149.94	-0.06
Width /mm	150	150.03	+0.03
Height /mm	40	39.97	-0.03
Average surface roughness / μm		4.334	

由表 6 可知, 激光粉末床熔化成形 TC4 钛合金点阵结构热交换芯体尺寸达到 149.94 mm × 150.03 mm × 39.97 mm, 尺寸偏差在 -0.06 ~ +0.03 mm 之间, 平均表面粗糙度为 4.334 μm 。

3.2.3 B30铜合金点阵结构热交换芯体的高精度制备

采用激光粉末床熔化成形技术制备铜合金点阵结构热交换芯体, 外形尺寸为 150 mm × 150 mm × 40 mm, 如图 11 所示。

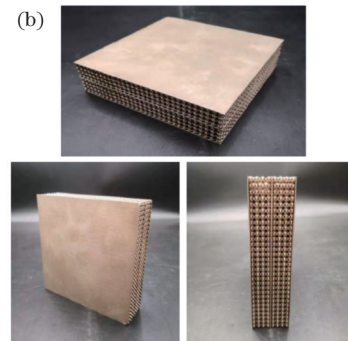
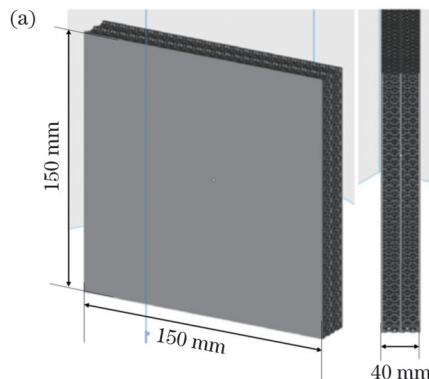


图 11 激光粉末床熔化成形 B30 合金点阵结构热交换器。(a)模型;(b)实物图

Fig.11 B30 alloy lattice structure heat exchanger formed by laser powder bed melting. (a) Model; (b) physical picture

经计算, 所制备的 B30 铜合金点阵结构热交换器的表面积达到 995450.991 mm^2 , 点阵结构热交换芯体的热交换效率为 1106.1 m^2/m^3 。因为 B30 铜合金与 TC4 合金点阵结构热交换芯体的外形尺寸完全一致, 因此两者的表面积和热交换效率的理论计算结果完全

一致; 316L 不锈钢点阵结构热交换芯体的厚度是 TC4 和 B30 合金热交换芯体厚度的一半, 因此其表面积 (565364.86 mm^2) 大致是后面两者 (约 995450.991 mm^2) 的一半, 但是热交换效率仍然大致相当 (前者为 1196.5 m^2/m^3 , 后面两者约为 1106.1 m^2/m^3)。

测量 B30 合金点阵结构热交换芯体的尺寸、表面粗糙度和尺寸精度,结果如表 7 所示。

表 7 B30 合金点阵结构热交换芯体的尺寸、表面粗糙度和尺寸精度

Table 7 Size, surface roughness, dimensional accuracy of B30 alloy lattice structure heat exchanger core

Parameter	Designed value	Measured value	Deviation / mm
Length / mm	150	149.95	-0.05
Width / mm	150	149.99	-0.01
Height / mm	40	40.02	+0.02
Average surface roughness / μm		7.611	

由表 7 可知,激光粉末床熔化成形的 B30 铜合金点阵结构热交换芯体截面尺寸为 149.95 mm \times 149.99 mm,表面粗糙度优于 10 μm ,尺寸精度优于 ± 0.1 mm。

3.3 热交换性能评价

本文采用图 12 所示装置对热交换器的热交换性能进行评价。

本在测试过程中,固定水流量为 0.5 L/min,入水口温度恒定为 22 $^{\circ}\text{C}$,环境温度为 25 $^{\circ}\text{C}$,加热单元的加热功率维持为 400 W,加热单元温度由室温逐渐升高,

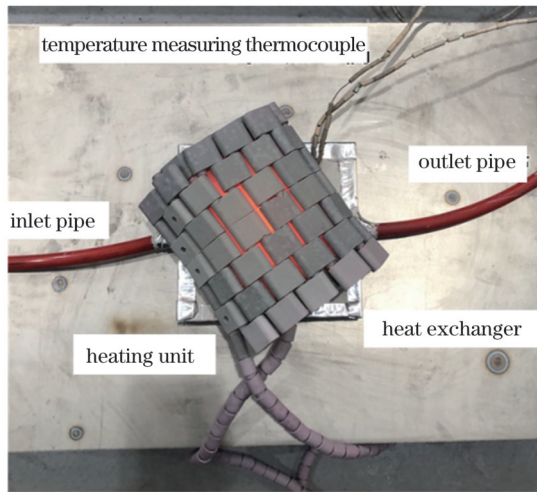


图 12 热交换器的热交换性能评价装置

Fig. 12 Heat exchange performance evaluation device for heat exchanger

试验记录加热体温度及出水口的水温随时间的变化,当加热单元温度在 ± 3 $^{\circ}\text{C}$ 范围内波动 5 min 时,认为热交换达到平衡状态。316L 不锈钢、TC4 钛合金和 B30 铜合金点阵结构热交换芯体的热交换曲线如图 13 所示。

由点阵结构的热交换曲线可知,在本文测试条件下,达到热交换平衡时,316L 不锈钢点阵结构的外表面温度为 177 $^{\circ}\text{C}$,达到热平衡的时间是 1700 s;TC4 钛合金点阵结构的外表面温度为 152 $^{\circ}\text{C}$,达到热平衡的时间是 1850 s;B30 合金点阵结构的外表面温度为 133 $^{\circ}\text{C}$,达到热平衡的时间是 1100 s。

热平衡时间从大到小依次排序为 TC4 钛合金、316L 不锈钢、B30 铜合金。初步的试验结果显示:点阵结构散热器的散热效果由强到弱依次排序为 B30 铜合金、316L 不锈钢、TC4 钛合金。但是,由于实际测量的 316L 不锈钢点阵结构的热交换芯体尺寸是 TC4 合金和铜合金点阵结构热交换芯体尺寸的一半,在尺寸相同的情况下,316L 不锈钢点阵结构热交换器的散热效果有可能会超过铜合金;TC4 合金和铜合金点阵结构热交换芯体尺寸相同,但是铜合金的散热效果在三者中最强,初步分析是由铜合金的导热系数高于 TC4 合金造成的。铜合金的表面粗糙度低于 316L 和 TC4 合金,会对液体流动造成较强的迟滞作用,从而增强散热效果,但不是主要作用,后续将展开详细的定量分析研究。

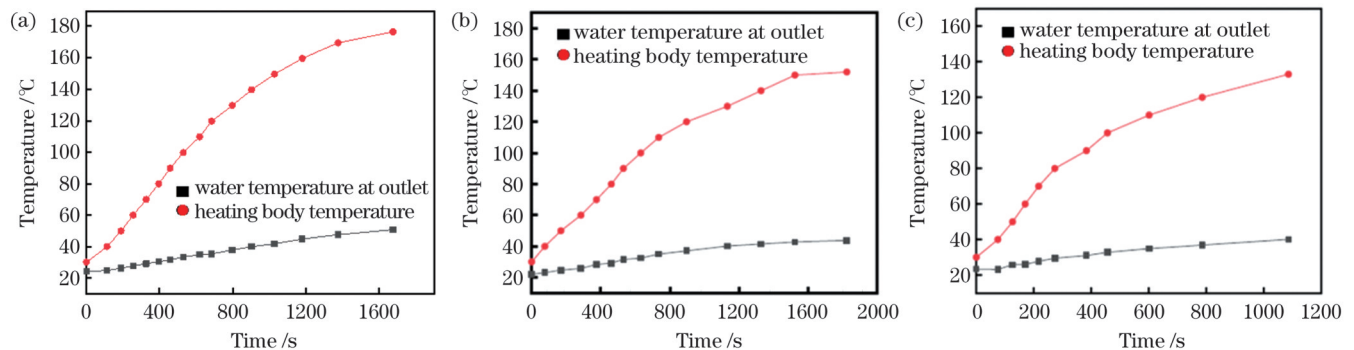


图 13 点阵结构的热交换曲线。(a)316L 不锈钢点阵结构;(b)TC4 合金点阵结构;(c)B30 合金点阵结构

Fig. 13 Heat exchange curves of lattice structures. (a) 316L stainless steel lattice structure; (b) TC4 alloy lattice structure; (c) B30 alloy lattice structure

4 结 论

以 Kagome 晶格为基础,优化得到了适合激光增材制造热交换器的点阵单胞结构尺寸。相比热交换效率为 $875 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 的传统板翅式热交换结构,点阵热交换结构在热交换效率提高 10% 的情况下,其体积减小了 24.9%,质量减小了 66.6%。通过激光粉末床熔化成形技术制备了 316L 不锈钢、TC4 钛合金及铜合金的点阵结构热交换芯体,热交换芯体尺寸达到 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$,热交换效率 $> 1000 \text{ m}^2/\text{m}^3$,尺寸精度控制为 $\pm 0.1 \text{ mm}$,表面粗糙度小于 $10 \mu\text{m}$,实现了三种不同材料的复杂金属点阵热交换结构的高性能高精度制备。热交换效率的评价公式应综合考虑热物性参数等因素的影响,有待进一步完善。

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] Dixit T, Nithiarasu P, Kumar S. Numerical evaluation of additively manufactured lattice architectures for heat sink applications[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2021, 159: 106607.
- [4] 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.
- [5] Helou M, DesignKara S., analysis and manufacturing of lattice structures: an overview[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2018, 31(3): 243-261.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Wadley H N G, Queheillat D T. Thermal applications of cellular lattice structures[J]. Materials Science Forum, 2007, 539/540/541/542/543: 242-247.
- [11] 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.
- [12] Yang G M, Hou C, Zhao M Y, et al. Comparison of convective heat transfer for Kagome and tetrahedral truss-cored lattice sandwich panels[J]. Scientific Reports, 2019, 9: 3731.
- [13] 王亚青, 刘东, 刘明侯, 等. 数值正交方法在微槽道散热器性能优化上的运用[J]. 中国激光, 2011, 38(7): 0702011.
Wang Y Q, Liu D, Liu M H, et al. Optimized design of micro-channel heat sinks with orthogonal simulation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(7): 0702011.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 李时春, 莫彬, 肖罡, 等. 金属材料的激光增材制造微观组织结构特征及其影响因素[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(1): 0100007.
Li S C, Mo B, Xiao G, et al. Microstructure characteristics and their influence factors during laser additive manufacturing of metal materials[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(1): 0100007.
- [18] 葛禄成, 赵紫松, 刘宁夏, 等. 铝含量对激光增材制造 TC4 合金组织及性能的调控[J]. 中国激光, 2021, 48(14): 1402004.
Ge L C, Zhao Z S, Liu N X, et al. Adjusting of Al additions on microstructures and properties of TC4 alloys fabricated by laser additive manufacturing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(14): 1402004.
- [19] Jafari D, Wits W W. The utilization of selective laser melting technology on heat transfer devices for thermal energy conversion applications: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 91: 420-442.

Laser Additive Manufacturing and Heat Transfer Performance Measurement of Lattice Structure Heat Exchanger

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

Institute of Welding and Plastic Forming, AECC Beijing Institute of Aeronautical Material, Beijing 100095, China

Abstract

Objective Traditional radiators have a large volume, heavy weight, and low dissipation efficiency. Using the laser-additive manufacturing technology, the volume and weight of the heat sink with lattice structure significantly reduce under

the same heat dissipation efficiency of the traditional radiator. Therefore, laser-additive manufacturing of heat sinks with lattice structures is a promising technology. In this study, three types of radiators with lattice structures are fabricated using laser-additive manufacturing technology with 316L, TC4, and B30 powder materials and compared with traditional radiators.

Methods Based on the confirmation of the powder characteristics, the laser-forming process parameters of the 316L stainless steel, TC4 titanium alloy, and B30 copper alloy are investigated. Alloy specimens with different metallographic parameters are formed, and their internal metallurgical properties are analyzed. Process parameters with good forming quality are selected as optimized technological parameters. Previous studies have shown that the Kagome lattice has a good heat dissipation effect, and the central vertex of the Kagome lattice acts as a vortex generator, which disrupts the basic flow and causes stillness and separation of media. The complex flow behavior simultaneously strengthens the conduction of the wall and connecting rod. In this study, the size of the Kagome lattice is optimized for laser manufacturing. Using laser selective melting, lattice-structured heat exchangers are fabricated with 316L stainless steel, TC4, and Cu alloys. A three-dimensional image of the lattice structure is reconstructed using computed tomography (CT), the heat exchange area value of the structure is also calculated, the core body size and the surface roughness of the laser-selective manufactured lattice structure are measured, and a self-made device is used to evaluate the heat transfer performance of the heat exchanger.

Results and Discussions The size of the three heat exchange cores with different materials reaches $150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$, the heat exchange efficiencies are all greater than $1000\text{ m}^2/\text{m}^3$ (Table 3), the dimensional accuracy is controlled within $\pm 0.1\text{ mm}$, and the surface roughness is less than $10\text{ }\mu\text{m}$ (Tables 5, 6, and 7). Compared with the traditional plate-fin heat exchanger with a heat exchange efficiency of $875\text{ m}^2/\text{m}^3$, which has the same size as that of the heat exchange core, the volume and weight of the lattice heat exchange structure decrease by 24.9% and 66.6%, respectively (Table 4), and the heat exchange efficiency increase by 10%. However, because single cells used have the same size, the simulated heat exchange efficiencies of the three material lattice structures are the same, but the values measured by micro-nano CT 3D imaging are different. This study demonstrates that the simulated value, compared with the measured heat exchange efficiency of the TC4 alloy lattice structure heat exchanger, has the smallest deviation. The deviation between the simulated and actual heat exchange efficiency values is primarily caused by the difference between the actual value and digital model obtained by printing. Currently, TC4 alloy is the most mature material in laser-selective melting formation, and it has good adaptability to laser-selective melting formation; therefore, the component obtained by printing is closer to the digital model. For the B30 copper alloy, owing to the high reflectivity of the laser, high thermal conductivity, and other factors, the difference between its laser-manufacturing components and mathematical models is significant. The 316L alloy case is intermediate between those of the TC4 and copper alloys.

Conclusions In this study, based on the Kagome lattice, the size suitable of lattice cell structure for additive manufacturing heat exchangers is optimized. Compared to the traditional plate-fin heat exchange structure with a heat exchange efficiency of $875\text{ m}^2/\text{m}^3$, the volume and weight of lattice structure decrease by 24.9% and 66.6%, respectively, when the heat exchange efficiency is increased by 10%. The lattice-structured heat exchanger cores with 316L stainless steel, TC4 titanium alloy, and copper alloy are prepared by laser-powder selective melting. The size of the heat exchange core reaches $150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$, and the heat exchange efficiency is greater than $1000\text{ m}^2/\text{m}^3$. The dimensional accuracy is controlled within $\pm 0.1\text{ mm}$, and the surface roughness is less than $10\text{ }\mu\text{m}$. The lattice-structured heat exchanger achieves high performance and precision for all three different materials. The evaluation formula of the heat exchange efficiency should comprehensively consider the influence of physical parameters and other factors to improve further.

Key words laser technique; additive manufacturing; lattice structure; heat exchanger; heat transfer performance