

激光与光电子学进展

激光粉末床熔融成形 AlSi10Mg 铝合金
复杂流道构件研究朱小刚^{1,2*}, 董安平¹, 程灵钰², 孙靖², 刘正武², 郭立杰²¹上海交通大学材料科学与工程学院, 上海 200240;²上海航天设备制造总厂有限公司, 上海复杂金属构件增材制造工程技术研究中心, 上海 200245

摘要 采用激光粉末床熔融技术制备不同截面与截面尺寸的长直流道试样以及复杂流道产品。研究表明,当流道截面尺寸小于 2 mm 时,激光粉末床熔融成形后流道的收缩而对残余粉末进行挤压,这将导致流道内残余粉末难以完全清除。此外,随着流道截面的增大,圆形流道上表面结合处呈现出表面质量变差的现象,而屋脊形截面流道由于倾斜角度保持不变而呈现较好的成形质量及尺寸精度。激光深穿透至非成形区粉末是造成流道上部区域粘附粉末颗粒的重要原因,而通过磨粒流、高压气流及水流等方式可以对其去除。结果表明,基于激光粉末床熔融技术设计与成形的复杂流道散热元件经 X 射线检测和计算机断层成像检测均无裂纹及残余粉末,并通过了 2 MPa 压力、保压 5 min 的耐压检测。最后,初步构建了复杂流道类构件的“设计—成形—检测”一体化流程。

关键词 激光技术; 激光粉末床熔融成形; AlSi10Mg 铝合金; 流道; 成形质量

中图分类号 TG665

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220455

Study on AlSi10Mg Alloy with Complex Flow Channels by Laser Powder
Bed FusionZhu Xiaogang^{1,2*}, Dong Anping¹, Cheng Lingyu², Sun Jing², Liu Zhengwu², Guo Lijie²¹School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;²Shanghai Research Center of Complex Metal Parts by Additive Manufacturing, Shanghai Aerospace Equipments
Manufacturer Limited Company, Shanghai 200245, China

Abstract The specimens with straight channels and the product with complex channels were manufactured by laser powder bed fusion. The results showed that when the diameter of the channel was less than 2 mm, the remaining powder inside the channels could not be removed completely due to the shrinkage of the flow channels after fabricated. In addition, the forming quality of the top surface of the circular channels became worse, with the increase of the diameter while the forming quality and dimensional accuracy for ridge shape channels still kept better with the increase of the size of the section, since the inclination angle of the inner surface was a fixed value. Meanwhile, the semi-melted powder particles adhered to the upper region of the flow channels caused by the deep penetration of the laser into the powder in the non-forming region could be removed by abrasive flow machining, high pressure airflow or water. The test results of the laser powder bed melting product with complex flow channels indicated that there were no defects such as crack or remaining powder by X-ray and computed tomography test. And the pressure test suggested that the product with complex flow channels was not damaged or leaked when the pressure reached 2 MPa for 5 min. Finally, the processes “design-form-test” were successfully established for the products with complex flow channels.

Key words laser technique; laser powder bed fusion; AlSi10Mg alloy; flow channels; forming quality

1 引言

随着增材制造技术的不断发展,以激光粉末床熔

融成形技术(LPBF)为代表的金属增材制造技术在航空领域得到了广泛应用^[1-6]。AlSi10Mg 铝合金,凭借其轻质高强的独特优势受到了国内外研究机构的

收稿日期: 2021-12-05; 修回日期: 2022-01-13; 录用日期: 2022-02-16; 网络首发日期: 2022-02-26

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB1103000, 2017YFB1104000)、中国航天科技集团有限公司共性工艺研究项目(GXGY-2020-07)

通信作者: *xiaogangzhu1986@163.com

广泛关注并开展了大量的研究^[7-10]。然而,激光粉末床熔融成形具有复杂流道结构特征的产品依然是进一步拓展增材制造工程应用的重要挑战。

Solyaev 等^[11]研究表明,当流道直径小于 2 mm 时,AlSi10Mg 铝合金流道的截面并不是圆形的,随着直径的减小,成形截面形状呈现出不规则性越来越明显。Koehly 等^[12]提出了 LPBF 技术可以用于制造聚变核反应堆的关键部件,如带有内部冷却通道的薄壁冷却板。Han 等^[13]研究表明,磨粒流(AFM)可以有效地改善流道内表面粗糙度并提升其冷却效率。NASA^[14]结合具体型号要求和 LPBF 技术特点,对 NANO Launch 的同轴式喷注器进行了管路拓扑优化设计,将传统的环状流道燃料管理方案改变为多个独立的围绕液氧管路的孔状流道,解决了原方案出现的管壁受压后的破坏问题,规避了燃料和液氧管理距离过进而引发的串腔风险。倪聪^[15]开展了 316L 不锈钢微流道换热器件 LPBF 成形技术研究,研究表明:对于直径为 1 mm 的圆孔,当倾斜角度为 0°和 15°时,圆孔顶部的弧度无法成型;当倾斜角度大于 30°时,随着倾斜角度的增大,圆孔的形状精度逐渐提高。刘梦娜等^[16]开展了 AlSi10Mg 铝合金液冷板 LPBF 成形技术研究,研究表明:采用 LPBF 成形的水平伸展和垂直伸展微孔的最小直径分别为 0.6 mm 和 0.4 mm,但其表面质量较差;直径为 1 mm 圆孔的形状精度依然较差。国内航天企业开展了液氧/甲烷发动机、液氧/煤油发动机喷注器、内部含有叶片流道的泵壳体、多型液氢/液氧发动机喷注器的直流喷嘴单元和离心喷注单元以及 15 吨级液氧/甲烷发动机燃气发生器用喷注器的 LPBF 成形技术研究^[17]。西安航天发动机有限公司对某型号喷注器采用 LPBF 技术打印后,零件数量由原来的 142 减少为 2,制造周期缩短 70%,成本下降 80%,采用增材制造技术简化了制造流程。首都航天机械有限公司

针对某发动机的泵壳体进行了激光粉末床熔融技术研究,该结构形状复杂,含有大量加强筋,壁厚差异较大,内部还有叶片流道,传统工艺采用分体铸造复合焊接的方案,采用 LPBF 技术一体化成形后,焊缝和内部缺陷大大减少,尺寸精度得到较大提升。深蓝航天“星云-M”1 号试验火箭采用 LPBF 技术研制了针栓式电动泵液氧煤油发动机,材料为镍基高温合金,该产品具有多型面、多腔道、再生冷却通道等结构特征,通过了一系列研制测试。

综上所述,目前 LPBF 成形复杂流道产品的研究与应用主要集中在铜合金、高温合金、钛合金等材料,而关于 AlSi10Mg 铝合金的复杂流道成形质量与粉末清除方面的研究较少,主要在激光粉末床熔融成形构件的显微组织、力学性能以及疲劳强度等方面开展了大量研究。

因此,本文拟采用 LPBF 技术制备不同截面与截面尺寸的 AlSi10Mg 铝合金长直流道试样以考察流道内表面成形质量、尺寸精度与流道内残余粉末清除难易程度,并进行具有复杂流道结构特征的产品流道设计与 LPBF 成形验证,为进一步推动 AlSi10Mg 铝合金 LPBF 成形复杂构件在航天、航空及其他领域的应用提供依据。

2 试验材料与方法

采用配备有 400 W 光纤激光器的 AM250 型激光粉末床熔融成形增材制造设备对铝合金粉末进行成形,工艺参数经优化如下:激光扫描功率为 400 W,扫描速度为 930 mm/s,扫描间距为 0.07 mm,铺粉层厚为 0.025 mm,基板预热温度为 80 °C,成形腔内氧含量(体积分数)控制在 0.1% 以下。试验中使用的粉末为 AlSi10Mg 铝合金粉末,粒径范围为 20~63 μm,扫描电镜(SEM)形貌如图 1 所示,化学成分如表 1 所示。

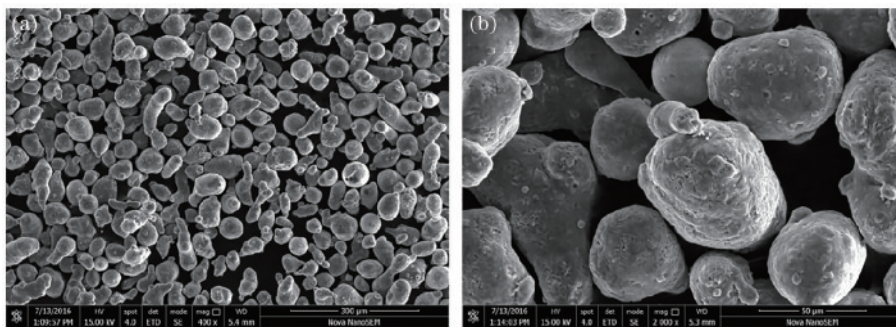


图 1 AlSi10Mg 铝合金粉末 SEM 形貌。(a) 400×; (b) 2000×
Fig. 1 SEM images of AlSi10Mg alloy powder. (a) 400×; (b) 2000×

表 1 AlSi10Mg 铝合金粉末的化学成分

Table 1 Chemical composition of AlSi10Mg alloy powder

Element	Al	Si	Mg	Fe	N	O	Ti	Zn	Mn	Ni	Cu	Pb	Sn
Mass fraction / %	Bal.	9.94	0.27	0.15	0.004	0.12	0.009	0.004	0.002	0.003	0.004	<0.002	<0.02

采用最优工艺参数 LPBF 技术直接成形: 1) 圆形截面长直道试样, 流道长度为 100 mm, 流道截面直径 d 分别为 $\Phi 0.5$ 、 $\Phi 1$ 、 $\Phi 1.5$ 、 $\Phi 2$ 、 $\Phi 2.5$ 、 $\Phi 3$ 、 $\Phi 4$ 、 $\Phi 5$ 、 $\Phi 6$ mm, 如图 2 所示; 2) 屋脊形截面长直道试样, 流道长度为 100 mm, 流道截面为宽度 B 分别为 0.5、1、1.5、2、2.5、3、4、5、6 mm, 如图 3 所示; 3) 圆形流道和屋脊形流道截

面尺寸测试示意图如图 4 所示, 圆形流道对横向直径 (d_1) 和纵向直径 (d_2) 进行测试, 屋脊形流道对宽度 (B) 和高度 (H) 进行测试; 4) 复杂流道散热元件, 外形尺寸为 $\Phi 174.5$ mm \times 159.6 mm。如图 5 所示, 其流道结构特征主要包括两类: 直径 $d = 4$ mm 的圆弧形流道和 $B = 3$ mm、 $H = 4$ mm、倾斜角度为 40° 的屋脊形流道。

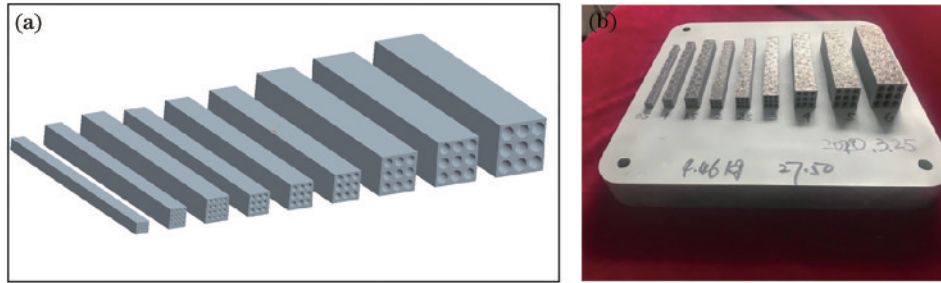


图 2 不同直径的圆形截面流道试样。(a) 试样三维模型; (b) LPBF 成形圆形流道

Fig. 2 Circular channel samples of different diameters. (a) Three-dimensional model of specimens; (b) circular channel formed by LPBF

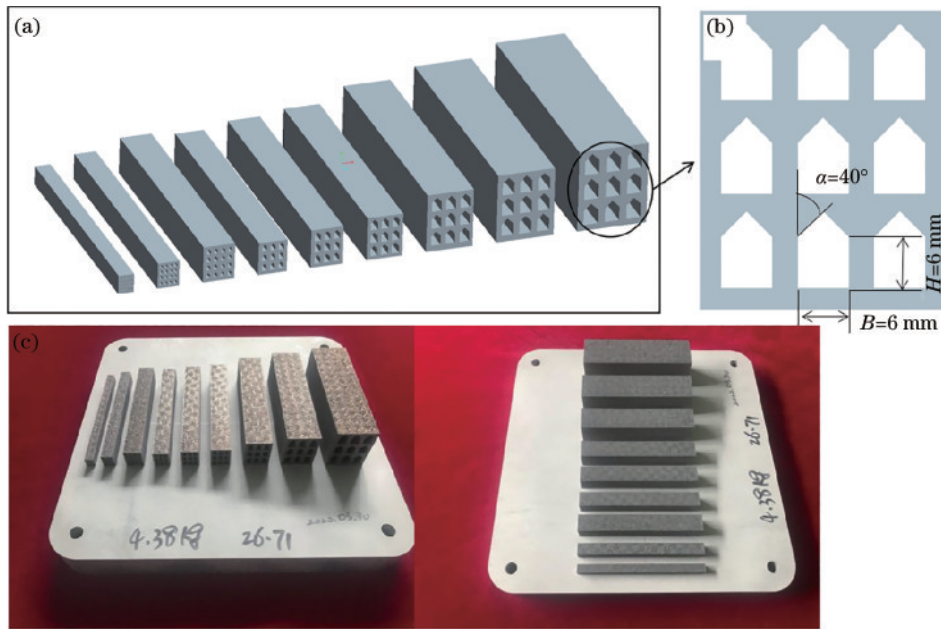


图 3 不同截面尺寸的屋脊形截面流道试样。(a) 试样三维模型; (b) $B = 6$ mm 时的截面尺寸示意图; (c) LPBF 成形屋脊形流道

Fig. 3 Ridge shape channel samples with different section sizes. (a) Three-dimensional model of specimens; (b) schematic of section size dimensions when $B = 6$ mm; (c) ridge shape channel formed by LPBF

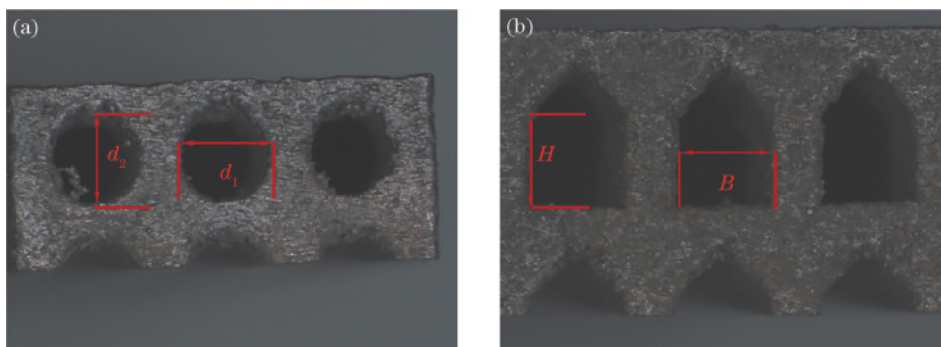


图 4 流道试样测试尺寸示意图。(a) 圆形流道; (b) 屋脊形流道

Fig. 4 Schematic of test size of channel sample. (a) Circular channel; (b) ridge shape channel

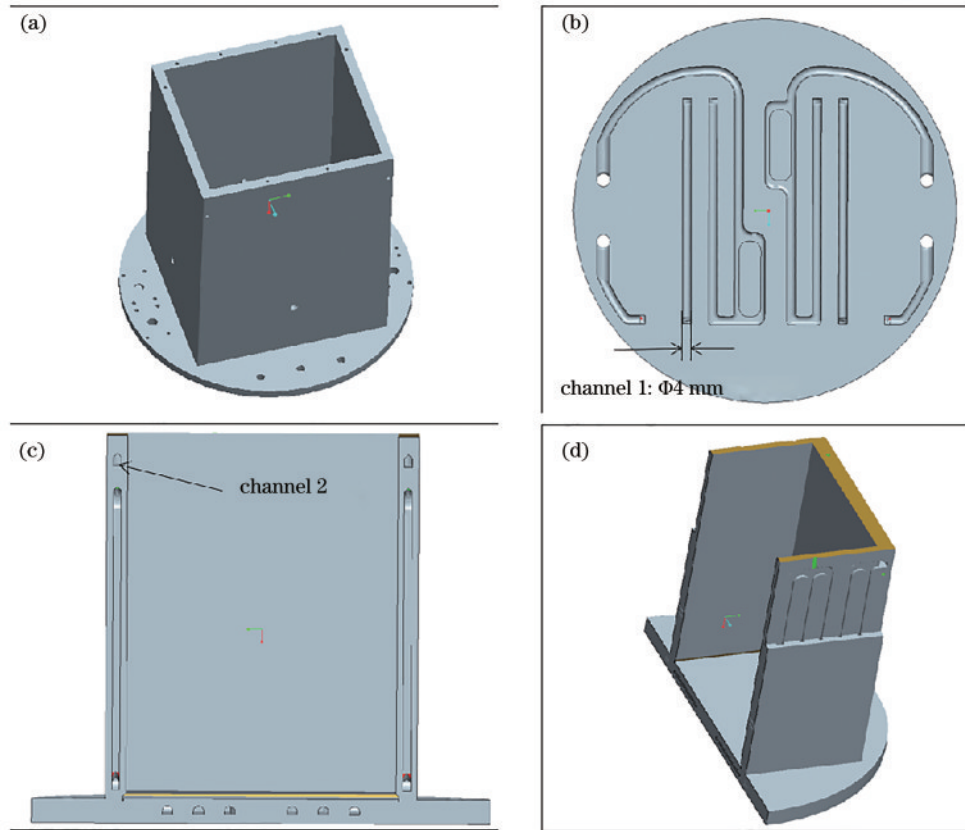


图 5 复杂流道散热元件三维模型。(a)模型前视图;(b)底部流道剖视图;(c)屋脊形流道位置示意图;(d)侧面流道局部剖视图
Fig. 5 Three-dimensional model of complex channel cooling element. (a) Front view of model; (b) bottom view of model; (c) position of ridge shape channel; (d) partial section view of side channel

在圆形截面与屋脊形长直流道试样成形结束后,考察流道内残余粉末清除的难易程度。对于粉末清理干净,沿着流道轴向对流道试样进行剖切,以考察流道内表面的成形质量变化规律。采用 ProgRes SpeedXT^{core5} 体视显微镜对流道端口放大 10 倍进行成形尺寸测试,采用 Phoenix v|tomelx S 高分辨率计算机断层成像(CT)系统对基于 LPBF 成形的复杂流道散热元件进行二维 X 射线检测和三维断层扫描检测。将

复杂流道散热元件的流道内注满水并施加 2 MPa 的压力保持 5 min,考察其耐压强度。

3 结果与讨论

3.1 内嵌流道成形机理研究

从图 6 可以看出:圆形流道截面的倾斜角随着高度变化而变化,尤其是靠近圆形流道顶部存在一个倾斜角度大于极限倾斜角度的区域,也称为非自支撑区

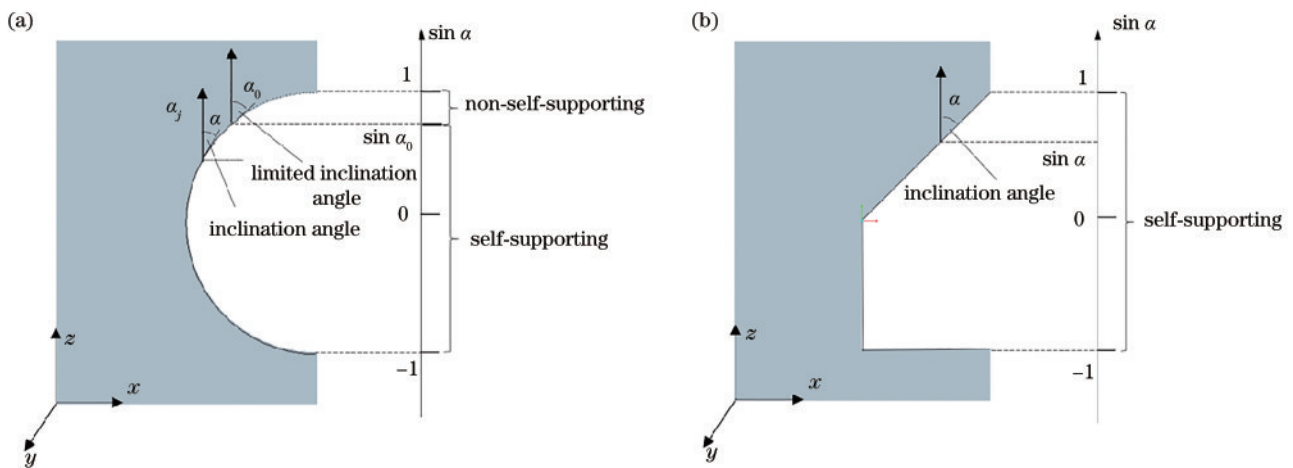


图 6 倾斜角度示意图。(a)圆形流道;(b)屋脊形流道
Fig. 6 Schematic of inclination angle. (a) Circular channel; (b) ridge shape channel

域,在该区域倾斜角呈逐渐增大趋势;而对于屋脊形流道的倾斜角随着高度的变化,倾斜角是恒定不变的。当倾斜角度大于极限倾斜角时,随着倾斜角的增大,倾斜面成形质量变差^[18]。从图 7 可以看出,为了能够实现圆形与屋脊形流道试样的成形,激光深穿透深度应大于一个粉层厚度。从图 7(a)可以看出,对于圆形截面流道,下半圆在成形过程中,激光深穿透产生的热量

将直接作用在已成形的铝合金实体上,而上半圆在成形过程中,激光深穿透产生的热量则可能直接作用在铝合金粉末颗粒上造成铝合金粉末颗粒的局部熔化而与已成形的铝合金实体粘附在一起。从图 7(b)可以看出,对于屋脊形截面流道,在倾斜面成形过程中,激光深穿透后产生的热量同样可能直接作用在已成形的铝合金实体上而在其表面形成微小焊合的粉末颗粒。

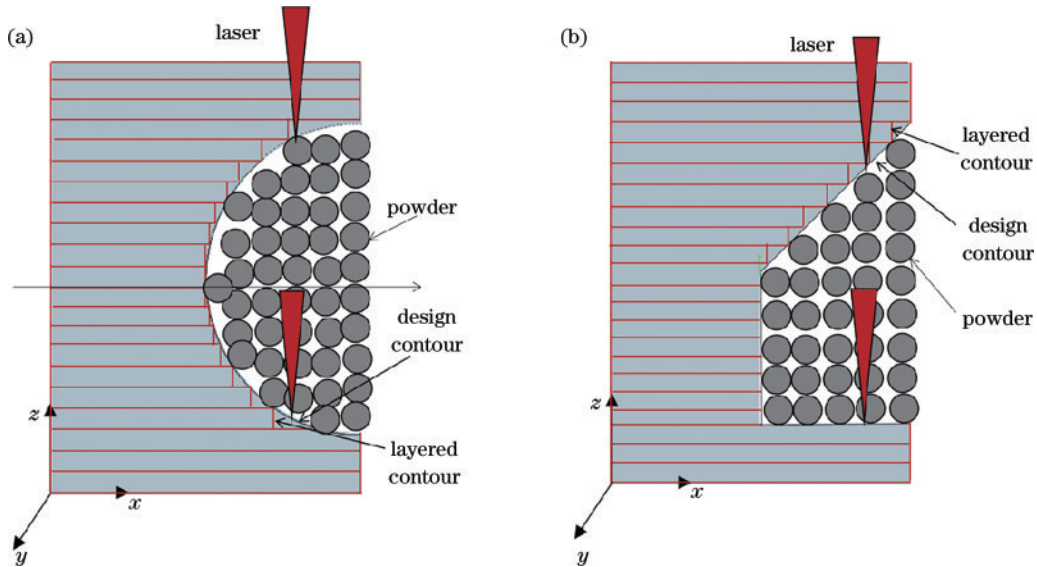


图 7 流道内表面粘附粉末颗粒机理示意图。(a)圆形流道;(b)屋脊形流道

Fig. 7 Schematic of mechanism of powder particles adhering to inner surface of channel. (a) Circular channel; (b) ridge shape channel

3.2 内嵌流道成形质量分析

从图 8(d)可以看出:直径 $d = \{0.5, 1, 1.5\}$ mm 的圆形流道可以实现 LPBF 成形,但流道内的残余粉末难以清理,这主要是由于流道成形后的收缩对残余粉末产生了挤压作用;当直径 $d \geq 2$ mm 时,圆形流道试样出粉口保持垂直向下,流道内的粉末会自动流出,同时,可以用橡胶锤敲击圆形流道试样,使得圆形流道内的残余粉末可以被完全清除,然而,从图 8(e)~(j)可以看出,随着流道直径的增大,流道顶部的表面质量变差,流道内顶部易于粘附半熔化颗粒而造成顶部结合处变得粗糙。从图 9(d)可以看出,当流道尺寸 $B < 2$ mm 时,同样存在流道内粉末难以清理的问题,但是,与圆形流道不同的是,随着流道尺寸的变大,流道顶部结合处依然保持较好的表面质量,如图 9(e)~(j)所示。从表 2 和表 3 可以看出:LPBF 成形圆形流道试样端口的横向直径和纵向直径均小于设计直径,且其纵向直径偏差大于横向直径,尤其在设计直径为 5 mm 时,其纵向直径比设计直径小 10%;LPBF 成形屋脊形流道试样的实际尺寸与设计尺寸相比偏差较小,其尺寸精度优于圆形流道。

综上所述可以看出,屋脊形流道相对于圆形流道在成形质量与尺寸精度方面具有一定优势。因此,在进行具有复杂流道结构特征的产品设计时应充分考虑到流道的截面形状和尺寸这两个影响因素。此外,可以通

过磨粒流、高压气流及高压水流等方式来去除微小焊合的粉末颗粒并起到提升流道内表面光洁度的效果,通过 CT 检测可以直观地考察流道内表面是否存在微小焊合的粉末颗粒。

3.3 复杂流道散热元件 LPBF 成形与验证

LPBF 成形复杂流道散热元件流道转弯处粉末清理方案如图 10 所示,在复杂流道散热元件的横向流道(即靠近流道转弯处)上设计出粉工艺孔,通过旋转与橡胶锤敲击、超声振动等方式进行流道内粉末清理,进而通过高压气流检查流道是否贯通并通过 CT 检测检查是否依然存在残余粉末,待粉末清理完毕后,则可通过机米螺钉和螺纹胶对出粉工艺孔进行封堵。图 11(a)、(b)为空间流道散热元件的 LPBF 成形过程。图 11(c)~(e)表明 LPBF 成形的复杂流道散热元件表面无缺陷。从图 11(f)可以看出,LPBF 成形复杂流道散热元件测试件的流道内粉末可以被完全清除且流道成形质量较好。从图 12 和图 13 可以看出,复杂流道散热元件 LPBF 成形件经 X 射线检测和 CT 检测表明,零件表面和内部无裂纹等缺陷及流道内无残余粉末颗粒,采用 CT 检测可以更好地考察流道的成形质量,尤其是流道内部是否存在残余粉末。最后,对复杂流道散热元件进行耐压测试,当水压升至 2 MPa 并保压 5 min,复杂流道散热元件并未发生泄漏或结构破坏现象,满足设计强度要求,如图 14 所示。

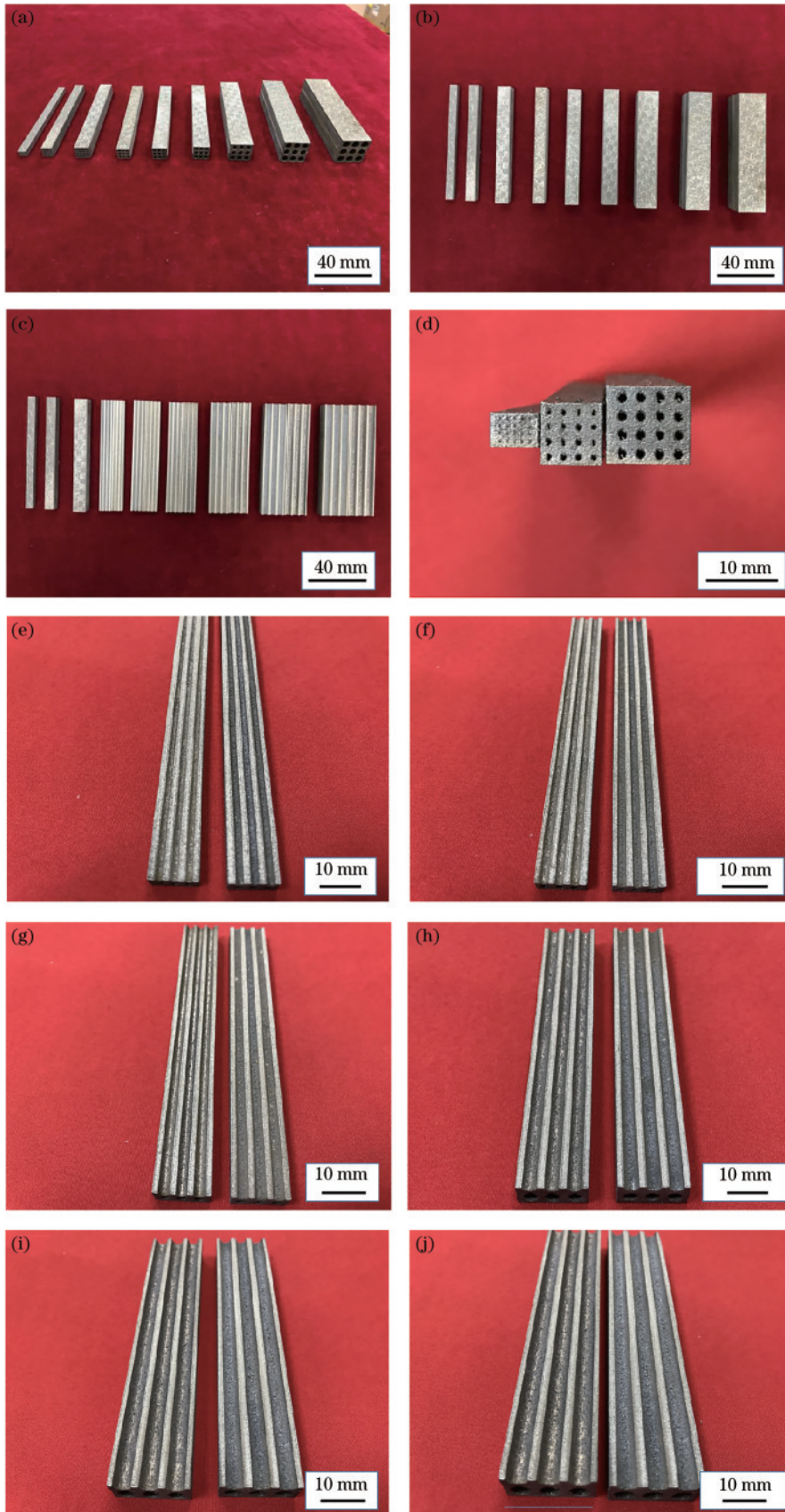


图 8 不同直径的 LPBF 成形圆形流道试样。LPBF 成形试样(a)前视图和(b)俯视图;(c)沿流道轴向剖切 LPBF 成形圆形流道试样;(d)LPBF 成形圆形流道试样;(e) $\Phi 2$ mm、(f) $\Phi 2.5$ mm、(g) $\Phi 3$ mm、(h) $\Phi 4$ mm、(i) $\Phi 5$ mm、(j) $\Phi 6$ mm 流道内表面形貌
 Fig. 8 Circular channel samples formed by LPBF with different diameters. (a) Front view and (b) top view of specimens; (c) circular channel sample formed by LPBF with axial section of channel; (d) circular channel sample formed by LPBF; (e) $\Phi 2$ mm, (f) $\Phi 2.5$ mm, (g) $\Phi 3$ mm, (h) $\Phi 4$ mm, (i) $\Phi 5$ mm, and (j) $\Phi 6$ mm of inner surface of channel

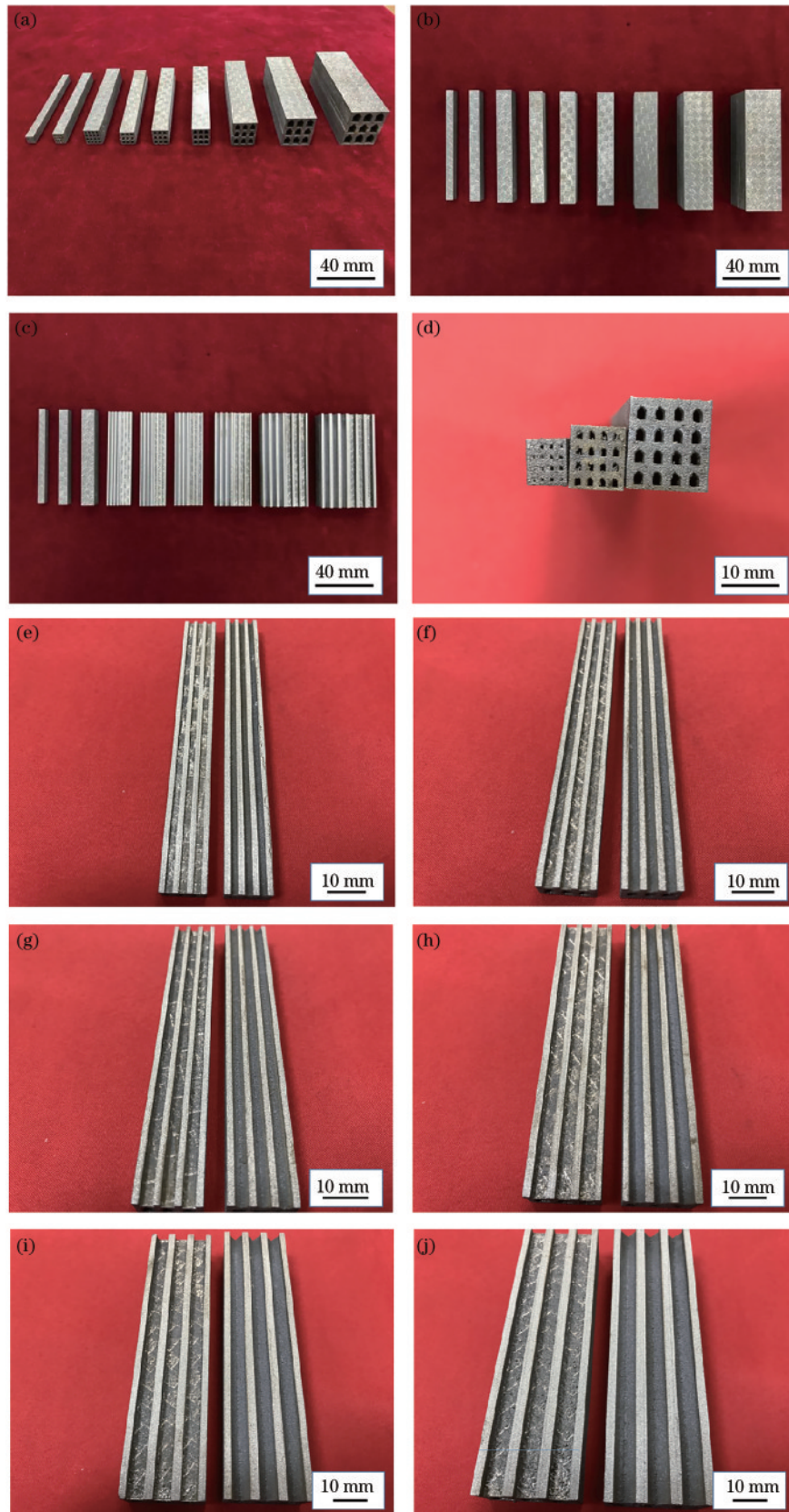


图9 不同截面尺寸的LPBF成形屋脊形流动试样。LPBF成形试样(a)前视图和(b)俯视图;(c)沿流动轴向剖切LPBF成形屋脊形流动试样;(d)LPBF成形屋脊形流动试样;(e) $B=2\text{ mm}$ 、(f) $B=2.5\text{ mm}$ 、(g) $B=3\text{ mm}$ 、(h) $B=4\text{ mm}$ 、(i) $B=5\text{ mm}$ 、(j) $B=6\text{ mm}$ 时流道内表面形貌

Fig. 9 Ridge shape channel samples formed by LPBF with different section sizes. (a) Front view and (b) top view of specimens; (c) ridge shape channel samples formed by LPBF with axial section of channel; (d) ridge shape channel samples formed by LPBF; (e) $B=2\text{ mm}$, (f) $B=2.5\text{ mm}$, (g) $B=3\text{ mm}$, (h) $B=4\text{ mm}$, (i) $B=5\text{ mm}$, and (j) $B=6\text{ mm}$ of inner surface of channel

表 2 圆形流道尺寸端口测试数据

Table 2 Measured diameter of circular channel size

Parameter	Value					
Design diameter d /mm	2	2.5	3	4	5	6
Lateral diameter d_1 /mm	1.788	2.014	2.757	3.818	4.728	5.730
	1.756	2.197	2.768	3.673	4.760	5.708
	1.777	2.057	2.585	3.780	4.663	5.848
Longitudinal diameter	1.616	2.111	2.574	3.721	4.502	5.751
	1.680	2.100	2.671	3.721	4.534	5.773
d_2 /mm	1.723	2.036	2.606	3.565	4.491	5.794

表 3 屋脊形流道端口尺寸测试数据

Table 3 Measured diameter of ridge shape channel size

Parameter	Value					
Size / (mm×mm)	2×2	2.5×2.5	3×3	4×4	5×5	6×6
Width	1.971	2.531	3.016	3.920	5.062	6.139
B /mm	1.971	2.386	2.908	4.039	4.987	6.085
	1.928	2.499	2.886	3.910	4.987	6.123
Highness	1.928	2.574	3.026	4.179	5.127	6.117
H /mm	2.014	2.402	2.736	3.974	5.008	6.134
	1.949	2.526	2.926	4.006	4.976	6.090

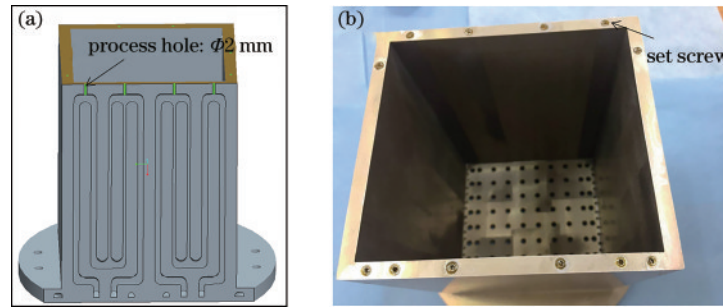


图 10 LPBF 成形复杂流道散热元件流道转弯处粉末清理方案。(a)直径为 2 mm 的出粉工艺孔；
(b)通过机米螺钉和螺纹胶对出粉工艺孔封堵

Fig. 10 Powder cleaning scheme for complex channel cooling element formed by LPBF at the turning part of flow channel. (a) Process hole for powder discharge with a diameter of 2 mm; (b) process hole is blocked by set screw and thread glue

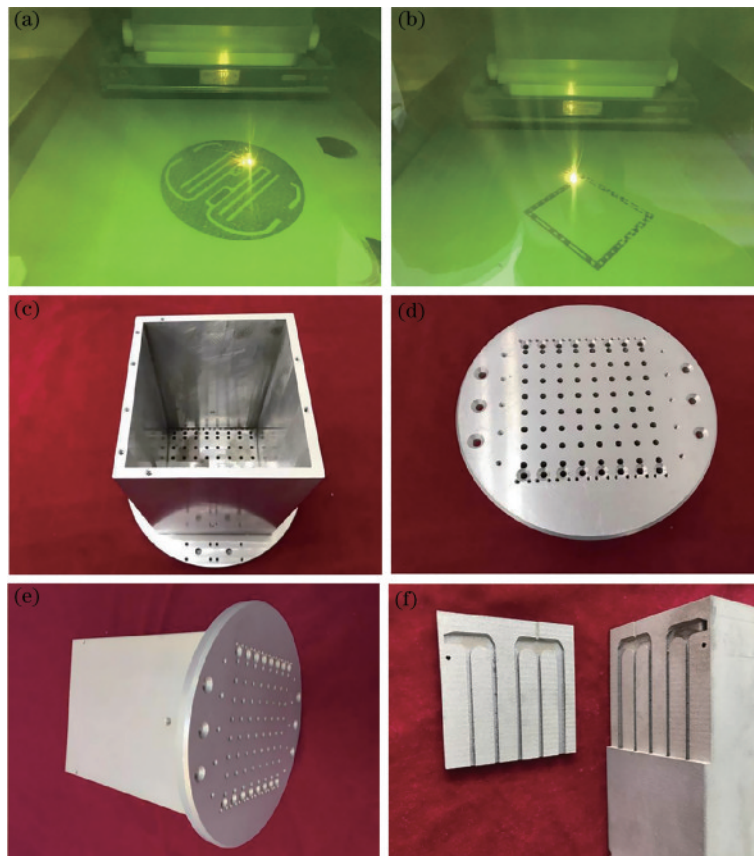


图 11 LPBF 成形复杂流道散热元件。(a)1#流道 LPBF 成形过程；(b)2#流道 LPBF 成形过程；(c)俯视图；
(d)底部图；(e)侧视图；(f)局部剖视图

Fig. 11 Complex channel cooling element formed by LPBF.(a)LPBF forming process of channel 1;(b)LPBF forming process of channel 2; (c) top view; (d) bottom image; (e) side view; (f) partial section view

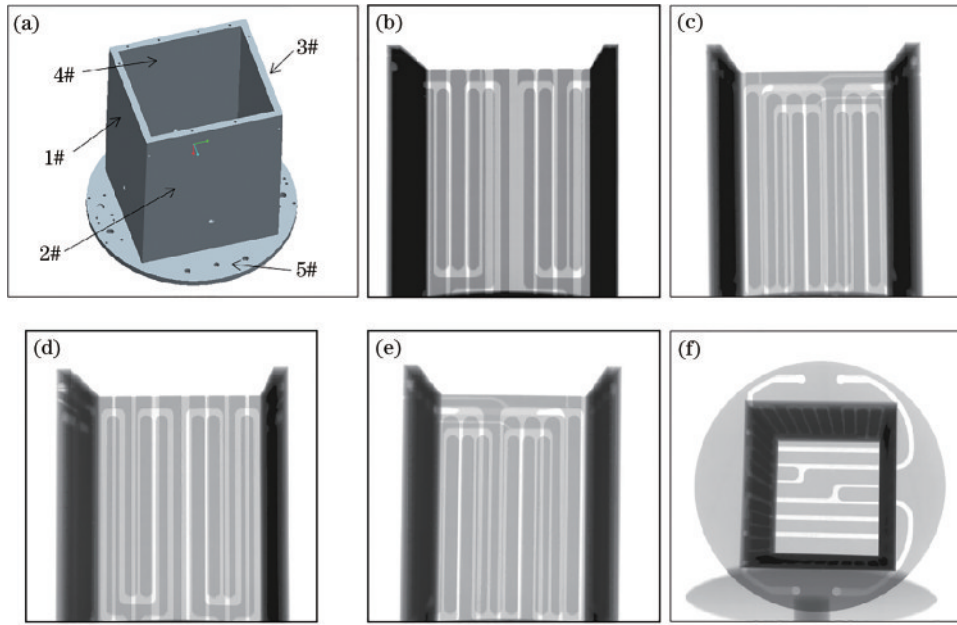


图 12 复杂流道散热元件 X 射线检测。(a)位置示意图;(b) 1#区域、(c) 2#区域、(d) 3#区域、(e) 4#区域、(f) 5#区域的检测图像
 Fig. 12 X-ray test of complex channel cooling element. (a) Location diagram; detection images of (b) 1# area, (c) 2# area, (d) 3# area, (e) 4# area, and (f) 5# area

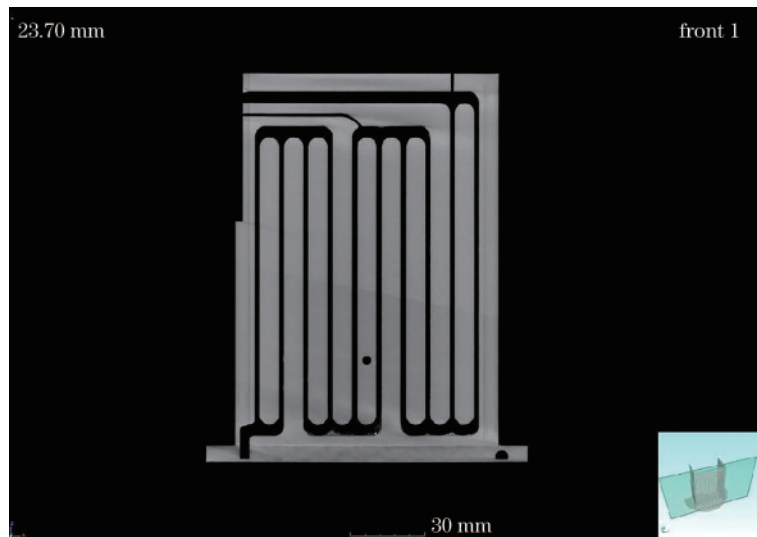


图 13 LPBF 成形空间流道散热元件 CT 检测
 Fig. 13 CT test of channel cooling element formed by LPBF



图 14 复杂流道散热元件压力测试。(a)向流道内注水;(b)压力表;(c)压力测试过程
 Fig. 14 Pressure test of complex channel cooling element. (a) Filling channels with water; (b) pressure gauge; (c) process of pressure test

4 结 论

采用激光粉末床熔融成形技术制备了 AlSi10Mg 铝合金流道试样及空间流道散热元件,研究了截面形状与尺寸对内嵌流道成形质量、尺寸精度与粉末清除难易程度的影响规律,并进行了复杂流道散热元件的 LPBF 成形与试验验证,得出的具体结论如下。

1) 在进行具有复杂流道结构特征的产品设计时,应充分考虑到流道的截面形状与尺寸;不管是圆形截面还是屋脊形截面,LPBF 成形内嵌流道的截面尺寸应不小于 2 mm;与圆形截面流道相比,屋脊形流道在 LPBF 成形表面质量及尺寸精度等方面具有一定优势。

2) 基于 LPBF 技术设计与成形的复杂流道散热元件经检测,零件表面及内部均无裂纹等缺陷,流道内无残余粉末,零件耐压强度满足设计指标要求;初步构建了复杂流道类构件的“设计—成形—检测”一体化流程,这为进一步拓展铝合金 LPBF 成形技术在航天领域的应用提供了技术支撑。

参 考 文 献

- [1] Laguna O H, Lietor P F, Godino F J I, et al. A review on additive manufacturing and materials for catalytic applications: milestones, key concepts, advances and perspectives[J]. *Materials & Design*, 2021, 208: 109927.
- [2] Blakey-Milner B, Gradl P, Snedden G, et al. Metal additive manufacturing in aerospace: a review[J]. *Materials & Design*, 2021, 209: 110008.
- [3] Zhang J L, Song B, Wei Q S, et al. A review of selective laser melting of aluminum alloys: processing, microstructure, property and developing trends[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2019, 35(2): 270-284.
- [4] 秦艳利, 孙博慧, 张昊, 等. 选区激光熔化铝合金及其复合材料在航空航天领域的研究进展[J]. *中国激光*, 2021, 48(14): 1402002.
Qin Y L, Sun B H, Zhang H, et al. Development of selective laser melted aluminum alloys and aluminum matrix composites in aerospace field[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(14): 1402002.
- [5] 杨胶溪, 吴文亮, 王长亮, 等. 激光选区熔化技术在航空航天领域的发展现状及典型应用[J]. *航空材料学报*, 2021, 41(2): 1-15.
Yang J X, Wu W L, Wang C L, et al. Development status and typical application of selective laser melting technology applications in aerospace field[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2021, 41(2): 1-15.
- [6] 张海青, 游良涛, 程忠辉, 等. 氧化铝对 SLM 成型 18Ni300 模具钢力学性能的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(23): 2316002.
Zhang H Q, You L T, Cheng Z H, et al. Effect of alumina addition on mechanical properties of 3D-printed 18Ni300 die steel[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(23): 2316002.
- [7] 闫泰起, 陈冰清, 唐鹏钧, 等. 铺粉层厚对选区激光熔化成形 AlSi₁₀Mg 合金质量及效率的影响[J]. *中国激光*, 2021, 48(10): 1002106.
Yan T Q, Chen B Q, Tang P J, et al. Effect of layer thickness on forming quality and efficiency of AlSi₁₀Mg alloy fabricated by selective laser melting[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(10): 1002106.
- [8] 侯伟, 陈静, 储松林, 等. 选区激光熔化成形 AlSi₁₀Mg 组织与拉伸性能的各向异性研究[J]. *中国激光*, 2018, 45(7): 0702003.
Hou W, Chen J, Chu S L, et al. Anisotropy of microstructure and tensile properties of AlSi₁₀Mg formed by selective laser melting[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(7): 0702003.
- [9] 唐鹏钧, 闫泰起, 李沛勇, 等. 激光选区熔化 AlSi₁₀Mg 合金退火后的显微组织和断裂韧性研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(10): 1002101.
Tang P J, Yan T Q, Li P Y, et al. Microstructures and fracture toughness of annealed AlSi₁₀Mg alloy formed by selective laser melting[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(10): 1002101.
- [10] 邹田春, 祝贺, 陈敏英, 等. 激光选区熔化碳化硅增强铝基复合材料的微观组织及拉伸性能研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(10): 1002123.
Zou T C, Zhu H, Chen M Y, et al. Microstructure and tensile properties of SiC reinforced aluminum matrix composite prepared by selective laser melting[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(10): 1002123.
- [11] Solyaev Y, Rabinskiy L, Tokmakov D. Over melting and closing of thin horizontal channels in AlSi₁₀Mg samples obtained by selective laser melting[J]. *Additive Manufacturing*, 2019, 30: 100847.
- [12] Koehly C, Neuberger H, Bühler L. Fabrication of thin-walled fusion blanket components like flow channel inserts by selective laser melting[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2019, 143: 171-179.
- [13] Han S, Salvatore F, Rech J, et al. Abrasive flow machining (AFM) finishing of conformal cooling channels created by selective laser melting (SLM) [J]. *Precision Engineering*, 2020, 64: 20-33.
- [14] Gradl P R, Greene S E, Protz C, et al. Additive manufacturing of liquid rocket engine combustion devices: a summary of process developments and hot-fire testing results[C]//2018 Joint Propulsion Conference, July 9-11, 2018, Cincinnati, Ohio. Virginia: AIAA Press, 2018: 4625.
- [15] 倪聪. 微流道换热器件激光选区熔化成形关键技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2021: 69-75.
Ni C. Research on key technologies in selective laser melting of micro-channel heat exchanger[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2021: 69-75.
- [16] 刘梦娜, 魏恺文, 邓金凤, 等. 铝合金液冷板激光选区熔化快速成形工艺研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(13): 1314002.
Liu M N, Wei K W, Deng J F, et al. Selective laser melting rapid forming technology of aluminum alloy liquid cold plate[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*,

2021, 58(13): 1314002.

- [17] 张武昆, 谭永华, 高玉闪, 等. 液体火箭发动机增材制造技术研究进展[J]. 推进技术, 2022, 43(5): 24-39.
Zhang W K, Tan Y H, Gao Y S, et al. Research progress of additive manufacturing technology in liquid rocket engine[J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(5): 24-39.

- [18] 朱小刚, 孙靖, 王联凤, 等. 激光选区熔化成形铝合金的组织、性能与倾斜面成形质量[J]. 机械工程材料, 2017, 41(2): 77-80.
Zhu X G, Sun J, Wang L F, et al. Microstructure, properties and inclined plane forming quality of aluminum alloy by selective laser melting[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2017, 41(2): 77-80.