DOI：10.16410/j.issn1000-8365.2021.06.005

激光选区熔化成型过程参数及缺陷影响分析

马大卫
(上海飞机设计研究院 飞机结构强度工程技术所，上海 201210)

摘　要：激光选区熔化(SLM)成型过程是一个逐层累积的过程，结构按照单道扫描(线)、单层扫描(面)、块体成型(体)的顺序依次打印。其中涉及的工艺参数众多，有激光固有参数、扫描策略参数、支撑结构参数等，且相互耦合影响，参数的好坏直接影响零件的最终力学性能及尺寸精度。本文对 SLM 成型过程中的参数及缺陷进行了系统性的分析，为基于 SLM 的复杂零件的设计制造提供整体研究思路。

关键词：激光技术；成型能力；激光选区熔化；工艺参数

中图分类号：TN249; TG665　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-8365(2021)06-0460-05

Analysis of Process Parameters and Defects in Selective Laser Melting

MA Dawei
(Structure and Stress Division, Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

Abstract: Selective laser melting (SLM) is a process of layer by layer accumulation. The structure is printed in the order of single channel scanning (line), single layer scanning (surface) and block forming (bulk). There are many process parameters involved, such as laser inherent parameters, scanning strategy parameters, support structure parameters, etc., and they are mutually coupled. The quality of the parameters directly affects the final mechanical properties and dimensional accuracy of the parts. In this paper, the parameters and defects in the forming process of SLM are systematically analyzed to provide an overall research idea for the design and manufacturing of complex parts based on SLM.

Key words: laser technique; forming quality; selective laser melting (SLM); process parameters

激光选区熔化(SLM)技术是通过对激光选区内的金属粉末完全熔化、经散热冷却凝固，基于分层–叠加制造的原理，层层累积成型出三维实体的快速成型技术；利用该技术可以直接制造高性能复杂金属部件，在航空航天、汽车、生物医疗等领域表现出良好的应用前景。经工艺优化后 SLM 成形零件致密度超过 98%，可直接满足工业使用要求。目前能够加工的金属主要包括不锈钢、工具钢、铝合金、钛合金、高温镍基合金等金属粉末。

目前针对 SLM 的研究主要有以下几个方面：成型装备、金属粉末、成型工艺、成型机理、成型过程模拟、成型件性能和成型件应用等。所有的研究目的均是为了获得致密度高、表面质量好、力学性能强的成型件。在设备和材料已经确定的前提下，对 SLM 技术的研究就集中在不同工艺参数对 SLM 快速成型质量的影响规律上。这些工艺参数主要包括：激光功率、扫描策略、扫描速度、扫描间距、铺粉厚度等方面，国内外的专业人士对此进行了大量的研究工作。

本文作者结合目前 SLM 成型过程的最新研究进展，对其过程工艺参数及可能产生的制造缺陷进行系统性的分析，为基于 SLM 的复杂零件的设计制造提供整体研究思路。

1　成型过程

1.1　单道扫描(线)

单道扫描是 SLM 成型过程中的最基本要素，面和体的成型均基于单道扫描之上，故研究单道扫描对了解面和体的成型规律以及优化成型参数有着重要的意义。

在单道扫描初始研究阶段，从能量角度讲，可引入“体能量密度 EVD_l”的概念，表征激光在单道扫描过程中熔化单位体积金属粉末所需的激光能量：

$$EVD_l=\frac{P}{\nu\sigma t}\left[\frac{J}{mm^3}\right] \quad (1)$$

式中，P 为激光功率，W；ν 为扫描速度，mm/s；σ 为激光光斑直径，mm；t 为粉末层厚(mm)。

P、ν、σ、t 直接影响单道扫描熔池的特征和形状，即决定熔池宽度 W 的大小。EVD_l 表示的是理论

收稿日期：2021-04-17

作者简介：马大卫(1987—)，江苏海门人，硕士，高级工程师. 研究方向：飞行器结构设计、增材制造等.
电话：13917787035，E-mail：madawei@comac.cc

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

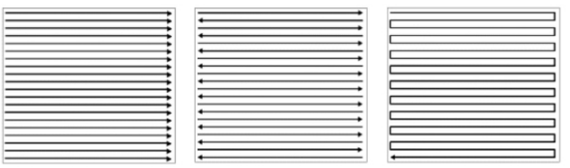
值而并非绝对值,因为在实际过程中,实际熔池宽度 W 比光斑直径 σ 大;但是可以在最初阶段定义此 EVD_l 值,然后通过实验手段来测定 EVD_l 与熔池宽度 W 之间的关系。一旦测定熔池宽度 W 的值,可在后续单层扫描中定义激光搭接量 η。

1.2　单层扫描(面)

对于任一需要打印的结构切面来说,其激光扫描信息包含两方面,一为面内扫描,二为轮廓扫描。

1.2.1　面内扫描

(1)面内扫描基本形式　面内扫描即在单道扫描的基础上激光多次累加,由线至面,从而实现结构某一切面的打印。引入激光向量的概念,即不考虑激光的熔池宽度,目前激光由线至面的基本扫描形式如图 1 所示。



(a)单向扫描　(b)双向扫描　(c)双向连续扫描

图 1　面内扫描基本形式

Fig.1　Basic patterns of surface scanning of selective laser melting

激光在沿单一矢量方向扫描时,其扫描速度通过震镜调节,由于系统惯性的作用,故存在一个加速、减速的过程。通过矢量原点的初始速度为 0,随后开始加速至设定速度,在即将到达矢量末端时开始减速,使得最终到达矢量末端的速度也为 0。故激光双向扫描比单项扫描可以有效增加打印速度,因为减少了激光在相邻两个扫描向量之间的转向距离,即减少了激光加速、减速所需要的时间。双向连续扫描实现了激光扫描矢量连续不断,因此激光在相邻两个扫描向量之间不必进行跳跃转向,提升了打印效率;但是由于偏镜的惯性作用,激光在拐角处速度会减慢,将造成局部能量摄入过大,可能导致成型缺陷。

(2)面内扫描策略　在激光面内扫描过程中,将产生复杂的热应力问题。热应力来源于激光辐射,由于 SLM 成型过程中激光作用区域小而集中,而且温度梯度大,在过高的温度梯度下将产生结构裂纹及内部缺陷,这种情况在成型大截面尺寸零件过程中更容易出现,故需要寻找合适的激光扫描策略来使激光的热分布均匀化,以有效释放零件内部应力。规划每层扫描向量可以减少内部缺陷,有利于得到致密度更高、力学性能更好的零件。

目前为解决此问题,常用的扫描策略为岛屿扫描法。该法是将结构的某一层面划分为“岛屿状”,每个岛屿内部可以施加图 1 中的 3 类基本扫描形式。图 2 所示即为某一层面划分正方形岛屿后并施加“单向扫描”形式后的示意图。激光在扫描整个面时,可以随机选择岛屿进行扫描,以分散热应力,如图 3 所示。在此基础上,还可以旋转相邻岛屿,并每一层可以设置相应的岛屿面内横、纵向偏移量,以最大程度减少成型过程中的热应力,如图 4 和图 5 所示。

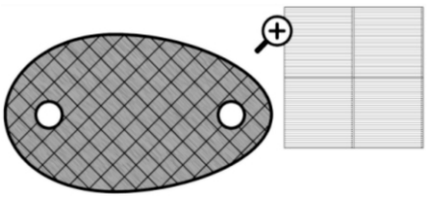


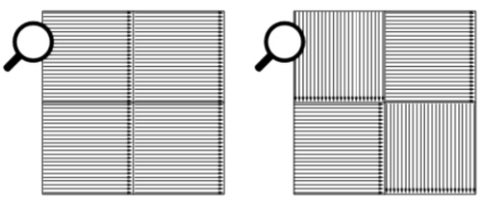
图 2　岛屿扫描法(单向扫描)

Fig.2　Island scanning(unidirectional)



图 3　岛屿随机扫描

Fig.3　Random Island scanning



(a)岛屿旋转前　(b)岛屿旋转后

图 4　相邻岛屿旋转示意

Fig.4　Schematic rotation of adjacent islands



(a)n层　(b)n+1层　(c)n+2层　(d)n+3层

图 5　各层岛屿偏移示意

Fig.5　Schematic island shift of each layer

(3)面内激光向量偏移补偿　实际成型过程中,由 1.1 介绍可知,每个激光向量都会产生一定宽度(单道熔池宽度 W)。为了使打印出的结构保证力学性能及尺寸精度,必须考虑相邻激光向量以及激光向量与相应边界间的偏移距离。

以简单的正方体结构为例,图 6 是正方体某一截面的激光面内打印策略示意图,其中外侧实线边框为实际正方体结构的外轮廓,点划线边框为考虑激光熔池宽度、并将激光向内补偿偏移后形成的实际打印边界,虚线边框为实施岛屿扫描策略后划分形成的面内岛屿边界。由此按打印边界和岛屿边界区分可以将扫描区域划分为以下 2 类。第一类为典

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

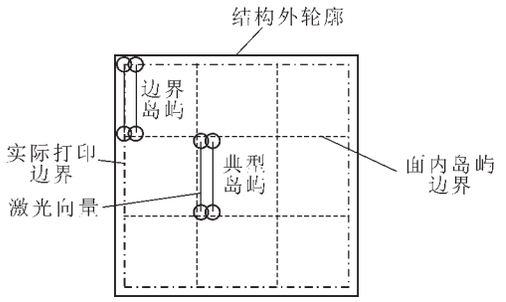


图 6 激光向量偏移补偿示意
Fig.6 Schematic laser vector offset compensation

型岛屿，全部由岛屿边界所构成；第二类为边界岛屿，由岛屿边界和打印边界组合而成。

图 7 为典型岛屿的简化示意图。定义 a_1 为相邻两束激光向量的中心偏距(扫描间距)；定义 a_2 为激光纵向偏距；定义 a_3 为激光横向偏距。定义激光偏距 a_1、a_2、a_3 的主要目的是使得相邻激光向量之间保持合适的搭接量。在此基础上，可以定义相应的激光搭接量 η，包括：岛屿中相邻激光向量的搭接量 $\eta_1=W-a_1$；相邻岛屿间的纵向激光搭接量 $\eta_2=W/2-a_2$；相邻岛屿间的横向激光搭接量 $\eta_3=W/2-a_3$。

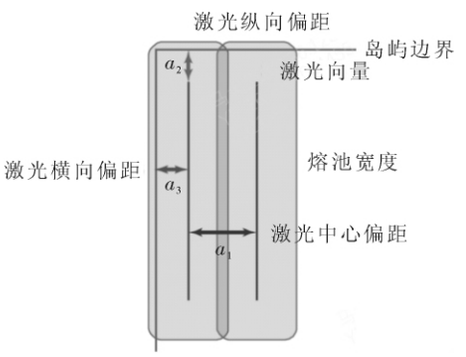
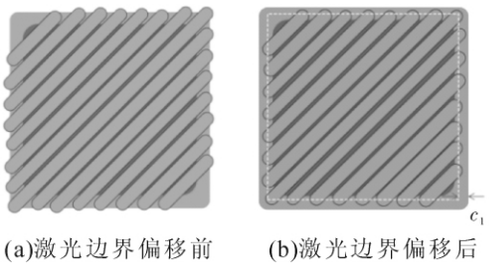


图 7 典型岛屿的简化示意
Fig.7 Simplified illustration of typical islands

激光搭接量 η 的大小对结构成型速度及成型质量有着重要影响。η 过大将造成搭接处摄入能量过多，从而造成结构缺陷、成型速度变慢等问题；η 过小则会产生搭接处粉末熔化不均匀等问题。故选取合适的 η 值需要大量的试验累计，要综合考虑成型速度、成型质量、表面精度等因素。

边界岛屿与典型岛屿的唯一区别在于激光向量在打印边界上不偏移，而仅在岛屿边界上才偏移。边界岛屿中打印边界直接影响成型零件的尺寸精度，其激光边界偏移量 c_1 一般为 $W/2$，才能保证成型后零件的外形尺寸精度。图 8 为激光边界偏移前后的区别示意。

在定义了激光中心偏距 a_1 后，可以将 2.1 中的“体能量密度”重新定义，用 a_1 替换式中的 σ，即可



(a)激光边界偏移前　(b)激光边界偏移后

图 8 激光边界偏移示意
Fig.8 Schematic laser boundary offset

得到：

$$EVD_{II}=\frac{P}{\nu a_1 t}\left[\frac{J}{mm^3}\right] \quad (2)$$

式中，P、ν、t 的含义和式(1)中保持一致。

在给定激光光斑直径 σ 的情况下，使用 EVD_{II} 相比单道扫描过程中采用的 EVD_I 来说，可更准确的表征打印过程中的能量传递。根据现有的研究，EVD_{II} 的大小直接影响激光成型件的力学性能。EVD_{II} 过小，则会出现粉末融化不足，导致成型件内部出现较大的不规则孔洞，使得零件的孔隙率变大，如图 9 所示。适当提高 EVD_{II} 可以有效减少孔隙率。但是 EVD_{II} 并不是越大越好，过大则会出现锁眼现象，如图 10。锁眼现象主要是由于局部能量过高，使得零件内部气体不能及时排除从而产生空隙，主要发生在岛屿搭接区域及边缘轮廓扫描区域。

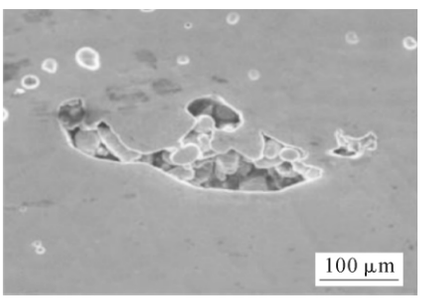


图 9 能量摄入不足出现不规则孔洞
Fig.9 Irregular holes caused by insufficient energy intake

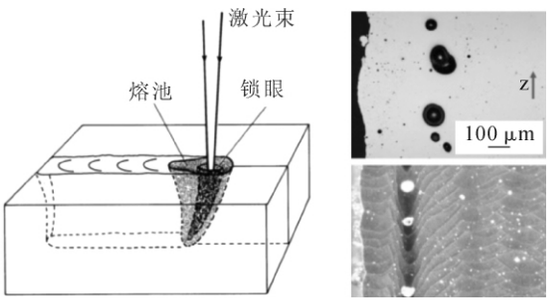


图 10 能量摄入过高造成锁眼现象
Fig.10 Keyholes caused by high energy intake

1.2.2 轮廓扫描

轮廓扫描即在完成结构某一切面的面内扫描后，对所在切面的轮廓边缘处补充进行扫描，可获得更好的边缘表面质量，如图 11 所示。同样考虑激光

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

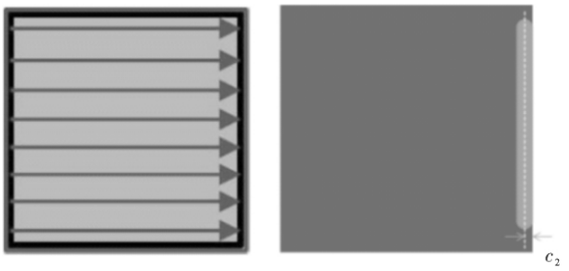


图 11 轮廓扫描示意
Fig.11 Schematic contour scanning

熔池宽度 W，激光在外轮廓处进行扫描时也需向内偏移一定距离 c_2，一般为 $W/2$，以保证结构的尺寸精度。

1.3 块体成型(体)

在单层扫描的基础上通过层层累积，便实现了整体结构的成型。理论上通过这种手段可以直接完成任意几何形状零件的制造，然而并非所有结构都可以直接打印出来，对于悬臂结构，如果悬臂端与基板平面的角度小于一定角度，那么结构将难以被打印或者表面成型质量较差，悬臂端下会出现挂渣等现象。图 12 展示了 2 种典型的悬臂结构在打印中出现的缺陷。

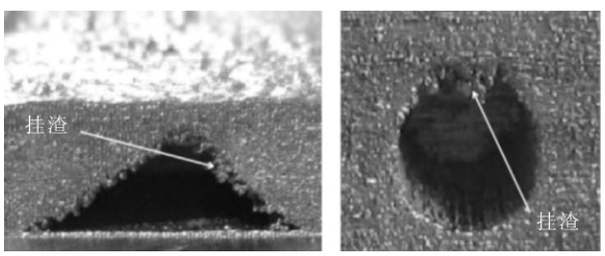


图 12 典型悬臂结构出现的挂渣缺陷
Fig.12 Hanging slag appeared on typical over hang structure

按照目前较为保守的工艺经验，其成型角度与成型表面质量的关系如图 13 所示。一般悬臂端与基板平面之间的角度建议不小于 45°，可保证结构成型，且无挂渣现象；若角度小于 45°，则可能出现成型失败或悬端表面质量急剧下降。

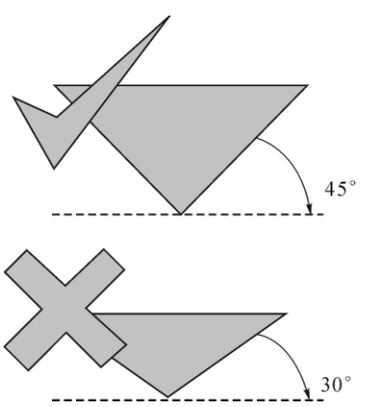


图 13 建议成型角度
Fig.13 Suggested forming angle

若想成型角度更小的悬臂结构，就必须在悬臂结构处添加支撑结构，如图 14 所示。支撑结构是 SLM 块体成型过程中的工艺中间态，类似于机械加工中的工装夹具，能保证打印过程中结构成型的稳定性，防止零件翘曲变形，其随结构一起打印，在打印完成后需要去除。在 SLM 块体成型过程中，支撑结构作用为：①承接下一层粉末层，保证粉末完全融化，防止出现塌陷；②抑制结构成型过程中受热及冷却产生的应力收缩，保持其应力平衡；③连接上方新成型部分，将其固定，防止其发生移动或翻转；④保证零件切割精度。

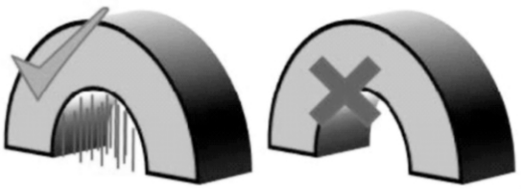


图 14 悬端添加支撑结构示意
Fig.14 Support structure added to overhanging end

由于实际成型的零件大多存在悬臂结构，故不可避免的会产生支撑结构，所以支撑结构可算成激光成型过程中的工艺固有特征，其支撑结构的参数选取对零件的最终成型精度至关重要。在某些可达性不好的结构区域内如果存在支撑，则面临难以去除的弊端，故在设计过程中必须考虑支撑的可去除性；如果不能去除，则必须改变结构特点以适应 SLM 的成型特点。

2 参数影响及缺陷分析

上文主要从线、面、体 3 个维度详细介绍了 SLM 成型过程的主要特点，可以看出 SLM 的成型过程十分复杂，成型过程中涉及的参数众多且相互影响制约，不同的参数选择会带来不同的成型效果。扫描单个岛屿所涉及的参数主要可用 EVD_{II} 来表示，其中包含激光功率 P、扫描速度 v、粉末层厚 t 及激光中心偏距 a_1；扫描多个岛屿所涉及的参数主要可用激光偏距 a_2、a_3 来表示，扫描边缘轮廓所涉及的参数主要可用激光偏距 c_1、c_2 来表示；其中 a_1、a_2、a_3、c_1、c_2 又和熔池宽度 W 有关。以上参数中激光功率 P 和扫描速度 v 是决定能量密度的核心参数，直接影响成型零件的孔隙率，孔隙率又直接影响成品的力学性能。块体成型主要受本身结构设计及支撑结构参数的影响，直接影响最终零件的成型效果。

从材料性能角度来看，如果选取的参数不合理，SLM 成型过程中主要会产生以下缺陷：

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

(1)出现不规则孔洞　此问题产生的原因主要包含以下几个方面:①激光能量摄入不足,即 EVD_{II} 过小;②粉末层厚 t、激光中心偏距 a_1 与熔池宽度 W 不匹配。

(2)出现内部锁眼　此问题产生的原因主要包含以下几个方面:①激光能量摄入过量,即 EVD_{II} 过大;②激光偏距 a_2、a_3 选取不合理,体现为岛屿间激光搭接量 η_2、η_3 过大,从而造成此区域能量摄入过大;③采用双向连续扫描,拐弯处速度降低,造成此区域能量摄入过大。

从结构成型角度来看,如果选取的参数不合理,SLM 成型过程中主要会产生以下缺陷:

(1)外形尺寸精度不足　此问题产生的原因主要由于 c_1、c_2 选取不合理,造成零件实际成型尺寸过大或过小。

(2)局部尺寸变形　此问题产生的原因主要由于支撑结构参数选取不合理,造成零件局部翘曲。

(3)支撑结构无法去除　此问题产生的原因为结构设计未考虑 SLM 的成型特点,造成成型后支撑结构无法去除。

3　结束语

本文对 SLM 成型过程中的参数及缺陷进行了系统性的分析,为复杂零件的设计制造提供以下整体研究思路:

(1)材料级样件的研究试制。通过大量的材料级样件试验,确定合适的激光功率 P、激光扫描速度 ν、激光光斑直径 σ、粉末层厚 t 以及激光偏移量(a_1、a_2、a_3)等,使得成型的样件具有较低的孔隙率及好的力学性能。

(2)结构级样件的研究试制。在确定(1)中参数(保证力学性能)的基础上,再进行结构级样件的制造;通过典型特征零件的试制,确定无支撑条件下零件可成型的工艺极限值及外形尺寸精度,以作为设计准则。

(3)复杂零件的设计与制造。针对多悬臂结构的复杂结构,在设计初期就应结合 SLM 的成型特点加以考虑,结合(2)中得出的设计准则,尽可能做到自支撑设计;如必须添加支撑结构,则需要选取合适的支撑结构参数,防止零件局部翘曲,并尽可能减少支撑或者保证支撑在后期是可去除的。

参考文献:

[1] WILLIAM E F. Metal additive manufacturing: a review[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2014, 23 (6): 1917-1928.

[2] CHEN H, GU D, DAI D, et al. Microstructure and composition homogeneity, tensile property, and underlying thermal physical mechanism of selective laser melting tool steel parts[J]. Materia- ls Science & Engineering A,2017(682): 297- 289.

[3] ZHAO S M, SHEN X F, YANG J L, et al. Investigation of densification, microstructural and mechanical properties of water-atomized 316 L stainless steel parts fabricated by selective laser melting [J]. Applied Laser melting[J].Applied Laser,2017,37(3):319-326.

[4] CHERRY J A, DAVIES H M, MEHMOOD S, et al. Investigation into the effect of process parameters on microstructural and physical properties of 316 L stainless steel parts by selective laser melting[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 76(5-8): 869-879.

[5] 宋国强, 陈秀生. 基于增材制造特性的航空发动机叶片快速成型工艺技术研究[J]. 铸造技术,2019,40(1):47-53.

[6] RAO H, GIET S, YANG K, et al. The influence of processing parameters on aluminium alloy A357 manufactured by Selective Laser Melting[J]. Materials and Design, 2016, 109:334-346.

[7] 马大卫,张文斌. 铝合金激光选区熔化成型能力研究[J]. 制造技术与机床,2019(9):64-169.

[8] 卢建斌,杨永强,王迪,等. 选区激光熔化成型悬垂面质量的影响因素分析[J]. 激光技术,2011,35(2):148-151.

[9] 吴根丽,刘婷婷,张长东,等. Ti6Al4V 选区熔化成形悬垂结构的研究[J]. 中国机械工程,2016,27(13):1810-1815.

[10] 曹冉冉,李强,钱波. SLM 快速成型中的支撑结构设计研究[J]. 机械研究与应用,2015,28(3):69-71.

[11] KUN V Y, PAUL R, TOM J, et al.Porosity formation mechanisms and fatigue response in Al-Si-Mg alloys made by selective laser melting [J]. Materials Science & Engi neering A,2018,712: 166-174.

[12] ABOULKHAIR N T, EVERITT N M, ASHCROFT I, et al. Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting, Additive Manufacturing, 2014, 1-4: 77-86.

[13] LADEWIG A, SCHLICK G, FISSER M, et al. Influence of the shielding gas flow on the removal of process by-products in the selective laser melting process, Additive Manufacturing 2016, 10: 1-9.

欢迎到当地邮政局(所)订阅 **2021** 年《铸造技术》杂志

国内邮发代号:52-64　国外发行号:M855　国内定价:25 元/本　海外定价:25 美元/本

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net