● 试验研究 Experimental Research ●

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2023.3170

可见光监测与 CT 检测融合驱动的高温合金 SLM 成形孔隙演变研究

周圣智[1],涂先猛[1],计效园[1],陈嘉龙[1],杨欢庆[2],王泽明[1],彭东剑[2],李 宁[1],周建新[1],高 亮[3]

(1. 华中科技大学 材料成形与模具技术全国重点实验室, 湖北 武汉 430074; 2. 西安航天发动机有限公司, 陕西 西安 710100; 3. 华中科技大学 机械科学与工程学院,湖北 武汉 430074)

摘 要:孔隙缺陷对 SLM 成形件的性能与可靠性有重大影响,现有孔隙演变研究主要从成形过程监测与成形结果分析两方面分离进行。本文提出一种成形过程监测与成形结果检测融合驱动的 SLM 孔隙随层厚演变研究新方法,获取 GH4169 合金 SLM 成形凝固的可见光监测图像与 SLM 成形件的 CT 检测图像,选取特定区域孔隙并提取特征参数,表征并分析两种图像中孔隙特征参数随层厚的变化。结果表明,CT 图像孔隙特征参数随层厚变化较可见光图像有滞后;孔隙形成的前半部分,第 N+1 层的成形对第 N(或及以下)层孔隙具有缩小作用,后半部分具有扩大作用;第 N+1 层的成形具有减小第 N(或及以下)层孔隙圆度的作用。结论有待进一步验证,但为 SLM 成形缺陷随层厚演变的研究提供了一种新思路,后续将继续深入研究。

关键词:SLM;GH4169;孔隙演变;可见光图像;CT 图像

中图分类号:TG146.1; TG665 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2023)07-0640-09

Research on the Evolution of Pores in Superalloy SLM Forming Driven by Fusion of Visual Light Monitoring and CT Detection

ZHOU Shengzhi[1], TU Xianmeng[1], JI Xiaoyuan[1], CHEN Jialong[1], YANG Huanqing[2], WANG Zeming[1], PENG Dongjian[2], LI Ning[1], ZHOU Jianxin[1], GAO Liang[3]

(1. State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Xi'an Space Engine Factory, Xi'an 710100, China; 3. School of Mechanical Science & Engineering , Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Pore defects have a significant impact on the performance and reliability of SLM (selective laser melting) formed parts. The previous pore evolution research is separately carried out from two aspects: the monitoring of the forming process and the analysis of the forming results. In this paper, a new method for studying the evolution of SLM pores with layer thickness driven by the fusion of forming process monitoring and forming result detection was proposed. By obtaining visible light monitoring images of GH4169 alloy SLM forming solidification and CT detection images of SLM formed parts, specific areas of a pore were selected and the feature parameters were extracted. Then, the changes in pore feature parameters with layer thickness in both images were characterized and analysed. The results show that the variation of pore characteristic parameters in CT images with layer thickness lags behind that in visible light images. In the first half of pore formation, the formation of the N+1 layer has a shrinking effect on the pores of the N(or below) layer, and the latter half has an expanding effect. The formation of the N+1 layer has the effect of reducing the roundness of the pores in the N (or below) layer. Since only specific pores have been studied, the conclusions need to be further verified. But this work

收稿日期:2023-06-13

基金项目:国家重点研发计划(2020YFB1710100);KGW 资助项目(2019XXX.XX4007Tm);国家自然科学基金(52275337、51905188、52090042)

作者简介:周圣智,2001 年生,硕士生.研究方向为金属增材制造技术研究.电话:15675667396, Email: 1539337919@qq.com

通讯作者:计效园,1986 年生,博士,副教授、博导.研究方向为铸造数字化、车间调度、缺陷识别、激光增材等技术研究. Email: jixiaoyuan@hust.edu.cn

引用格式:周圣智,涂先猛,计效园,等.可见光监测与 CT 检测融合驱动的高温合金 SLM 成形孔隙演变研究[J].铸造技术,2023,44(7): 640-648.

ZHOU S Z, TU X M, JI X Y, et al. Research on the evolution of pores in superalloy SLM forming driven by fusion of visual light monitoring and CT detection[J]. Foundry Technology, 2023, 44(7): 640-648.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

provides a new way to study the evolution of SLM forming defects with layer thickness, which will be further studied in the future.

Key words: SLM; GH4169; pore evolution; visible light images; CT images

选区激光熔化技术(selective laser melting, SLM)作为增材制造技术的一种，正逐步成为国内外研究热点。SLM 技术以直径非常小的激光光斑作为能量源，采用“离散降维”的方法简化复杂制造[1]，SLM 成形原理如图 1 所示。SLM 成形是在惰性保护气体氛围中，先铺粉，再依据零件截面的几何信息确定扫描路径，通过高功率激光沿设定的扫描路径熔化预先铺好的金属粉末，当完成一层的制造后，成形平台下降一定高度，重复上述铺粉与熔化粉末的过程，直到零件加工完成[2]。与传统制造技术相比，SLM 技术具有以下几个特点：①可成形复杂零件，不受外形复杂程度约束[3]；②材料利用率高[4]；③SLM 成形制件的性能优良[5]；④后处理工序简单[6]。

目前 SLM 技术已广泛应用于汽车、国防、生物医疗、航空航天等领域，并且产业规模仍在不断增长[7]。但孔隙作为 SLM 成形制件常见缺陷的一种，对 SLM 成形制件的性能与可靠性具有重大的影响。SLM 成形件难以完全消除孔隙缺陷，过多孔隙缺陷会使 SLM 成形制件的伸长率、疲劳等力学性能无法满足使用要求[8]，对成形件的性能与可靠性产生重大影响。

关于 SLM 孔隙缺陷，国内外学者做了大量研究。2017 年，南京航空航天大学顾冬冬等[9]采用数值模拟方法研究了不同激光扫描速度下的孔隙变化行为，结果表明，扫描速度在确定孔隙类型方面起着重要作用。2018 年，华中科技大学段伟等[10]对钛合金 TC4 激光熔覆过程进行数值模拟，分析了不同激光功率、焊接速度下激光熔覆过程中的温度场及应力场，并预测了缺陷可能出现的位置。2019 年，丹麦技术大学 Mohamad Bayat 等[11]采用数值和实验相结合的方法对选区激光熔化孔隙问题进行研究，分析了 SLM 小孔诱导气孔的形成、演化和消失及其引发机制，结果表明，孔隙的形成与局部冷区的存在关系密切。2023 年，华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室徐晓静、伍缘杰等[12-13]针对 SLM 铺粉缺陷等问题，搭建了一种基于图像处理的 SLM 铺粉缺陷检测识别与分类系统，该系统对铺粉缺陷的检测识别具有较高的识别精度与检测效率，有助于提升 SLM 生产效率和生产品质。2023 年，上海交通大学王洪泽等[14]基于实验观察到的小孔–渗透孔，建立了一个多物理有限体积模型，其中小孔由于其不稳定性而穿透熔池，小孔尖端过早地被凝固界面捕获，其形成可以归因于锁孔波动。SLM 成形过程在封闭的成形室中进行，许多重要信息不便于直接观察。因此，国内外众多研究采用红外、X 射线等手段，对 SLM 孔隙进行研究。2020 年，美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室 Forien 等[15]利用高速红外二极管热像仪和高速光学成像信号，对不同激光功率和速度的 LPBF 打印进行了监测，结果表明，高温计信号和熔池尺寸随激光功率的增大和速度的减小而增大。2020 年，清华大学赵沧等[16]使用高速 X 射线成像对 Ti-6Al-4V 中孔隙的形成过程进行了操作性观察，发现关键锁孔不稳定，在熔池中产生声波，为锁孔尖端附近的孔隙提供额外的驱动力，使其远离锁孔并被捕获为缺陷。2021 年，美国佐治亚理工学院 Elliott W 等[17]使用 CT 检测得到的拉伸样品，研究了

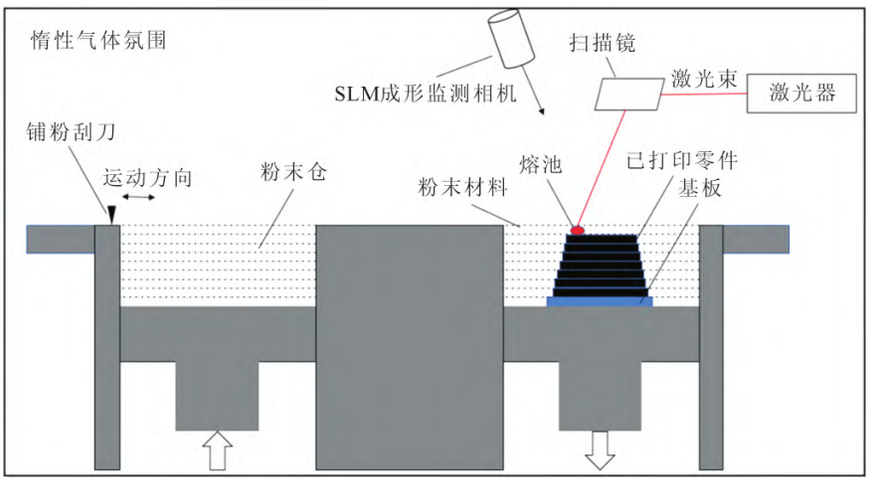

图 1 SLM 成形原理示意图
Fig.1 Schematic diagram of the SLM forming principle

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

孔隙率与拉伸性能之间的关系，结果表明，总伸长率和均匀伸长率是受孔隙率影响最显著的拉伸性能。2022 年，英国伦敦大学学院 Huang YZ 等[18]利用同步加速器 X 射线成像，揭示了激光粉末层熔融成形过程中锁孔和气孔的行为。2022 年，新加坡国立大学 Wang 等[19]采用 X-CT 扫描 SLM 打印件的孔隙，深入研究孔隙影响零件的拉伸行为。2022 年，瑞士联邦材料科学与技术研究所 Pandiyan 等[20]采用由 4 个传感器(背反射(BR)、可见光、红外(IR)和结构声发射(AE))组成的传感系统，对 SLM 成形过程中的孔隙进行原位监测。

当前，国内外学者围绕 SLM 成形孔隙缺陷，开展了较为充分的研究，研究内容包括工艺参数对孔隙的影响以及孔隙行为分析等，采用的方法主要有数值模拟、机器视觉等，近些年，还涌现了众多采用 X 射线等新型手段观测 SLM 孔隙的研究，但是现有的 SLM 孔隙观测研究基本都是仅针对 SLM 孔隙成形过程或者 SLM 孔隙成形结果单方面开展的，关于两者之间差异的研究较为缺乏。

本文针对高温合金材料 GH4169 开展 SLM 孔隙缺陷研究，获取监测 SLM 成形过程的可见光图像与检测 SLM 成形结果的 CT 图像，从 SLM 成形的过程监测与结果检测两个方面对 SLM 孔隙进行研究，分析 SLM 成形孔隙随层厚的演变规律。

1 实验材料与方法

1.1 实验准备

该研究的材料为 GH4169，是一种沉淀强化的镍基高温合金，具有良好的加工、焊接性能，能够制造各种形状复杂的零部件，在航天航空、核能、模具等领域应用广泛。其主要化学成分如表 1 所示。

采用的 SLM 打印设备为课题组特别定制 BLT S210，在原设备基础上增加了可见光检测相机，并且集成了扫描检测功能。当完成 1 层激光扫描使金属粉末熔化凝固后，相机自动拍摄 1 张打印凝固完成后的可见光图像。拍摄的可见光图像中，单个像素的实际尺寸约为 40 μm，接近 1 个粉粒的尺寸，相当于 1 个可见光图像像素代表 1 个粉粒。在统计代表孔隙像素的个数时，数量越少，统计误差越大，因此，本文针对孔隙开展的研究，只适合大尺寸孔隙(孔隙尺度在 100 μm 及以上)。对打印的 GH4169 合金拉伸件试样图像进行研究，拉伸件形状尺寸如图 2 所示。相机拍摄的可见光图像存储在 BLT S210 设备中，通过 CT 扫描，得到该批次样品的 CT 图像。获取打印件可见光图像与 CT 图像流程如图 3 所示。

在该批次的拉伸件打印件中，基于视觉分析，38 号打印件的孔隙较多较为明显，因此选取 38 号打印件的可见光图像与 CT 图像进行分析。38 号打印件的工艺参数如表 2 所示。

从图像中能提取关于孔隙的信息，最直观的就是孔隙周长与面积，周长用 C 表示，面积用 S 表示，因此本文选取孔隙的周长 C 与面积 S 作为特征参数。仅有周长与面积两个特征参数，只是对孔隙的大小维度进行了分析。为了更深入地了解孔隙的演变规律，增加圆度这一特征参数，对孔隙的形态变化进行分析，圆度用 R 表示，通过下式计算：

$$R=4\pi S/C^2 \tag{1}$$

式中，R 为与 1 个完美圆的相似程度，取值范围在(0,1)，值越接近 1，表示与圆的相似性越高。因此，需要从图像中提取孔隙的信息有 C 与 S。

1.2 图像处理

从设备获取可见光图像后，选取 38 号打印件图像。获取到的原始可见光图像中，白色区域为孔隙缺陷，打印件内黑色区域为填充部分，介于白色与黑色的灰色区域对孔隙缺陷的提取有干扰作用。因此，需要进行图像增强处理，以突出孔隙缺陷特征，屏蔽其

表1 GH4169合金成分
Tab.1 Chemical composition of GH4169 superalloy

元素组成	Ni	Cr	Co	Mo	Al	C	Fe
含量(质量分数,%)	50~55.0	17.0~21.0	≤1.0	2.80~3.30	0.30~0.70	≤0.08	Bal.

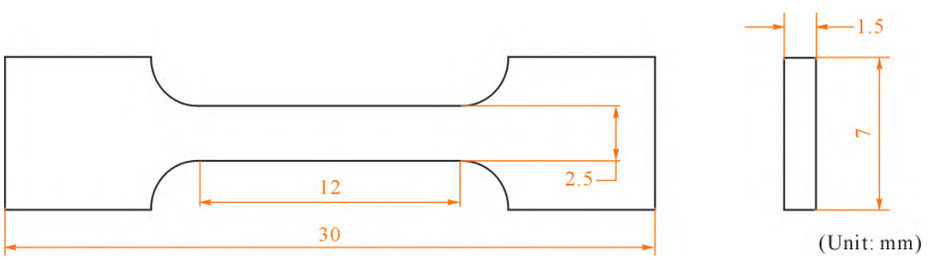

图 2 拉伸件样品设计示意图
Fig.2 Schematic diagram of sample design for stretched parts

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

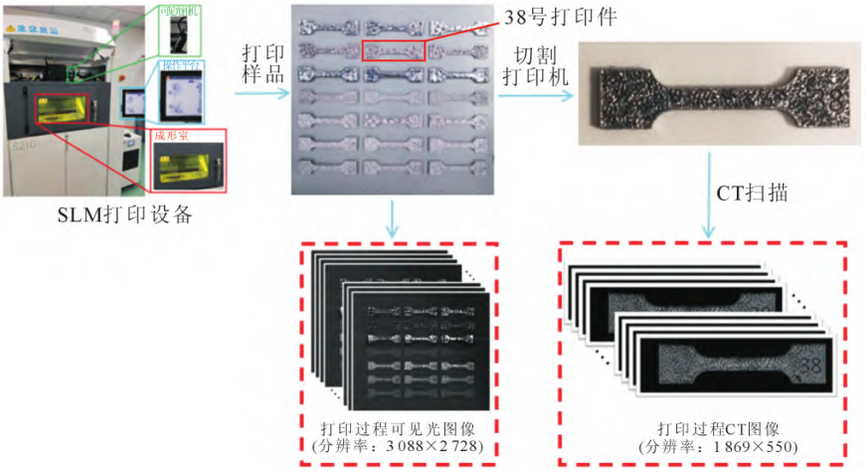

图 3　可见光图像与 CT 图像流程图
Fig.3　Flow chart for obtaining visible light images and CT images

表2 38号打印件工艺参数表
Tab.2 Process parameters for print No. 38

序号	激光功率 /W	扫描速度 /(mm·s^{-1})	扫描间距 /μm	铺粉层厚 /mm
38	240	800	90	0.03

他干扰信息。

对 38 号打印件的可见光图像，尝试了几种图像增强处理，最终选定 Gamma 变换处理。Gamma 变换表达式为：

$$Vout=Count\times Vin^{\gamma} \tag{2}$$

式中，Vout 为变化后的灰度值；Vin 为原灰度值；Count、γ 为常数。Gamma 变换属于非线性变换，在 Gamma 变化中，输出图像灰度值与输入图像灰度值呈指数关系。设置参数：Count=0.000 000 05，γ=4，该参数设置可使得输出结果也在 0~255 范围内。Gamma 变换依据像素点自身差异进行区分，图像中的孔隙部分不会产生严重的失真，并且是通过指数的方式差异化，具有很强的区分能力。经过 Gamma 变换后，原图的灰色区域与黑色区域均被压缩至黑色区域，而白色区域基本保留，达到了突出孔隙缺陷、抑制其他区域干扰信息的要求。

在完成对可见光图像的增强处理后，对图像进行二值化处理。对可见光图像进行二值化处理，对比发现阈值设置为 130 效果较好。可见光图像原图、Gamma 变换后的可见光图像及二值图像对比如图 4(a)所示。CT 图像原材料填充背景为白色，孔隙缺陷为黑色，经过二值化后的图像孔隙为黑色，填充材料为白色。设置不同阈值，经过对比，最终设置 CT 图像的二值化阈值为 63。CT 图像原图与二值图像对比如图 4(b)所示。

1.3　可见光图像与 CT 图像对应孔隙确定

SLM 成形过程中，第 N+1 层的铺粉与打印对第 N(或及以下)层有影响，成形过程中的第 N 层与成形完成后该层的成形情况有所不同。SLM 成形过程中，在第 N 层出现的孔隙，可被相机捕捉，但受到后续成形的影响，孔隙可能被填充。同时，原本在打印过程中第 N 层未出现的孔隙，在经历后续的成形后，可能在第 N 层出现一个新的孔隙，这两种情况

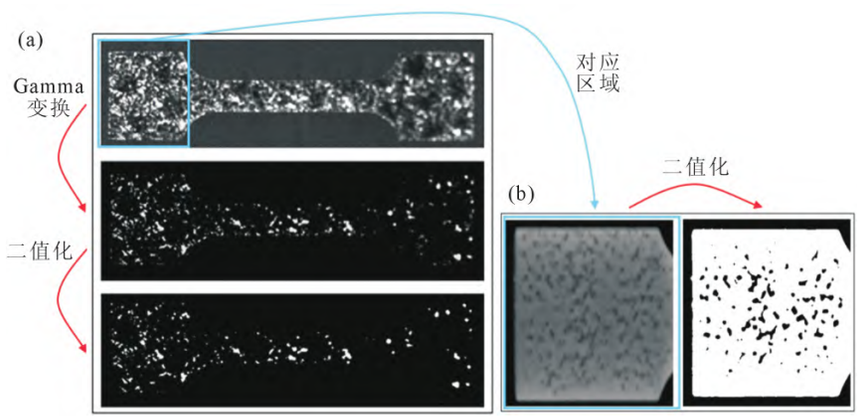

图 4　图像处理前后对比：(a) 可见光图像原图(上)，Gamma 变换图像(中)，二值图像(下)，(b) CT 图像原图(左)，二值图像(右)
Fig.4　Comparison of images before and after image processing: (a) original image of visible light image (top), gamma transform image (middle), binary image (bottom), (b) original CT image (left), binary image (right)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

都会导致可见光图像与 CT 图像中的孔隙不对应。

为了研究孔隙的演变规律，需要从可见光图像与 CT 图像中找出一组相对应的孔隙。采用视觉观察方法，在可见光图像与 CT 图像的二值图像中寻找对应的孔隙缺陷。经过视觉观察，最终在 11-17 号可见光图像与 8-16 号 CT 图像中同一区域内找到一组相对应且较为完整的孔隙缺陷图像，提取 11-17 号可见光图像与 8-16 号部分 CT 图像，如图 5 所示，将该特定孔隙作为目标孔隙进行后续研究。

在可见光图像中，拍摄的前 5 层打印为基板与打印件的连接部分，第 5 层后开始打印样品。根据工艺参数可知，铺粉层厚为 0.03 mm，因此可见光图像11-17 号对应的实际样品层数为 6-12 层，对应的实际层厚分别为 0.18 和 0.36 mm。CT 图像中，1.5 mm 的打印件等间距拍摄了 59 张图像，打印件被分成 60 等分，则相邻两张 CT 图像层厚间距为 0.025 mm。因此 CT 图像中 8 号与 16 号图像对应的层厚分别为 0.2 和 0.4 mm。目标孔隙层厚如表 3 所示。可见光图像与 CT 图像中目标孔隙随层厚变化如图 6 所示。

1.4 目标孔隙周长与面积提取

采用了一种基于卷积操作的孔隙周长与面积提取方法。首先，用切片提取出二值图像中包含目标孔隙缺陷的小范围矩形区域。再定义一个行列数与划分区域相同的 flag 标签矩阵，矩阵中的元素排列与提取的小矩形区域一致，并且对 flag 矩阵中的元素做如下设置：若像素点为孔隙缺陷区域，则 flag 列表中该像素点的对应位置的值设置为 1；若像素点不为孔隙缺陷区域，则 flag 矩阵中该像素点的对应位置的值设置为 0。

表3 可见光图像与CT图像目标孔隙层厚
Tab.3 Target pore layer thickness of visible light images and CT images

可见光图像		CT 图像	
序号	层厚/mm	序号	层厚/mm
11	0.18	8	0.200
12	0.21	9	0.225
13	0.24	10	0.250
14	0.27	11	0.275
15	0.30	12	0.300
16	0.33	13	0.325
17	0.36	14	0.350
-	-	15	0.375
-	-	16	0.400

其次，定义卷积核 kernel，卷积核 kernel 的表达式如式(3)所示，令 kernel 卷积核与 flag 标签矩阵做卷积操作。本文中进行的卷积操作并不是一般常见的卷积运算，在 kernel 卷积核与 flag 标签矩阵卷积前，先判定与 kernel 卷积核进行卷积的 3×3 卷积区域中心元素为 0 还是为 1：中心元素为 0，表明该点为非孔隙区域，结果用 0 代替；中心元素为 1，表明该点为孔隙区域，则进行卷积运算。

最后，根据卷积结果进行分类讨论。kernel 卷积核与 flag 标签矩阵中孔隙区域卷积运算结果 result

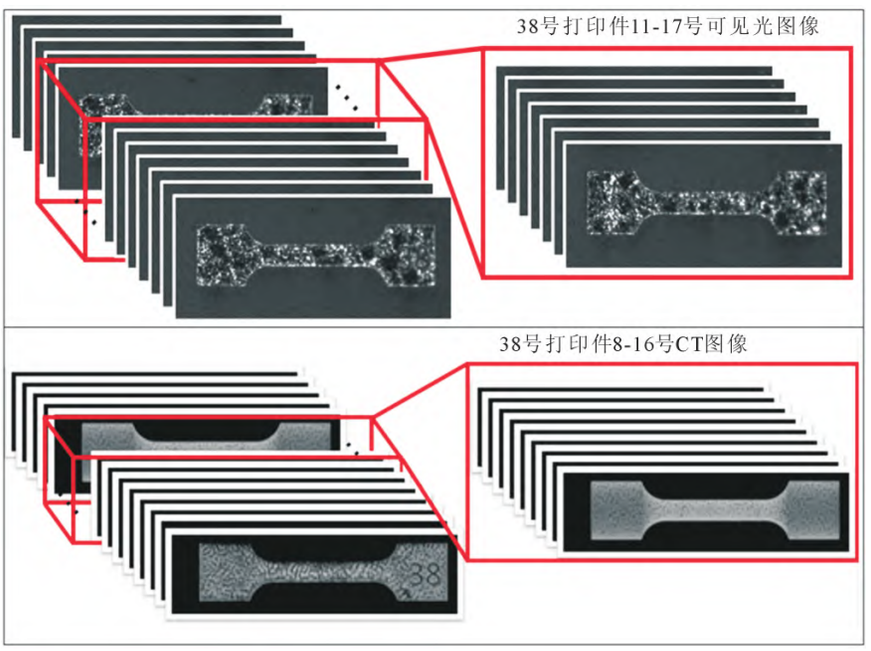

图 5 38 号打印件的可见光图像(上)与 CT 图像(下)
Fig.5 Visible light images (top) and CT images (bottom) of print No.38

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

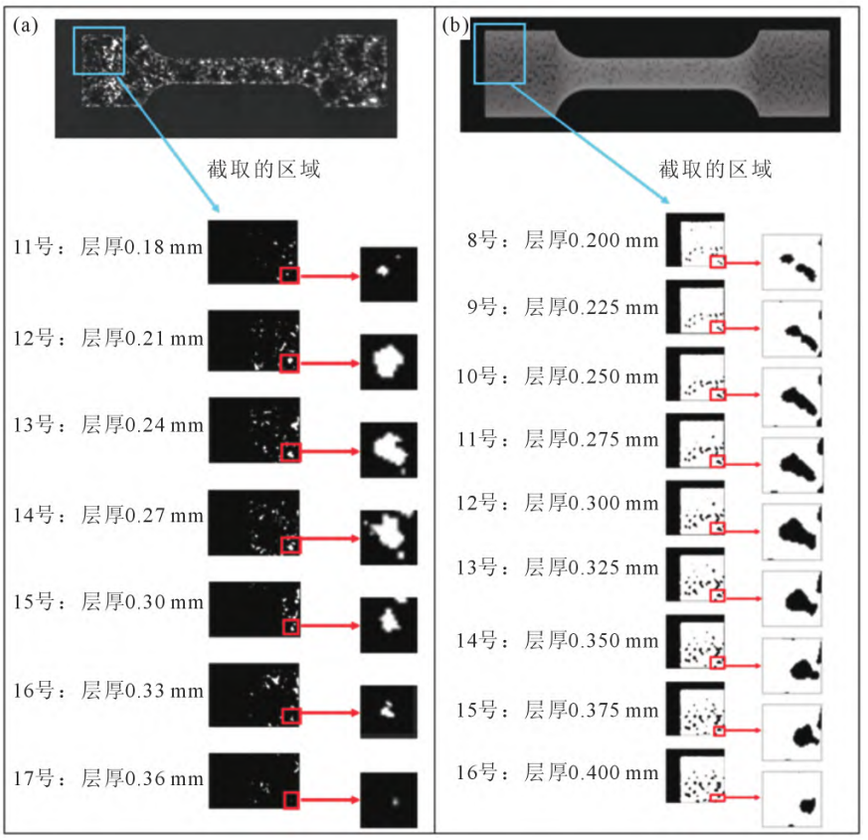

图 6 38 号打印件：(a) 可见光图像孔隙随层厚变化，(b) CT 图像目标孔隙随层厚变化

Fig.6 Print No.38: (a) variation in pore with layer thickness in visible light images, (b) variation in pore with layer thickness in CT images

只有 1、2、3、4、5，5 种，根据这 5 种结果进行讨论，讨论分析如图 7 所示。

$$\text{kernel}=\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \tag{3}$$

综上所述，在计算周长时，统计代表周长像素个数表达式为∑(5-result)；在计算面积时，统计代表面积像素个数表达式为∑(number of pixels)。

2 实验结果及讨论

2.1 可见光图像与 CT 图像目标孔隙结果统计

对 38 号打印件可见光图像 11-17 号图像中的目标孔隙提取周长与面积，统计可见光二值图像中目标孔隙代表周长和面积的像素个数。使用 ImageJ 软件测量单个像素点的实际尺寸，测量结果表明，每个像素代表的实际长度为 0.040 7 mm。将孔隙转换为实际大小，并计算孔隙圆度，结果如表 4 所示。采用同样的方法对 CT 图像序号 8-16 图像中的目标孔隙提取周长与面积，统计代表孔隙周长与面积的像素个数。测量出 CT 图像中每个像素的长度为 0.018 46 mm。将孔隙的周长与面积转换为实际大小，并计算孔隙圆度，如表 5 所示。

卷积结果	卷积结果为1	卷积结果为2	卷积结果为3	卷积结果为4	卷积结果为5
卷积区域的可能情况（X表示0或1）	$\begin{bmatrix} X & 0 & X \\ 0 & 1 & 0 \\ X & 0 & X \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} X & 0 & X \\ 0 & 1 & 1 \\ X & 0 & X \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} X & 0 & X \\ 0 & 1 & 1 \\ X & 1 & X \end{bmatrix}$ 或 $\begin{bmatrix} X & 1 & X \\ 0 & 1 & 0 \\ X & 1 & X \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} X & 1 & X \\ 1 & 1 & 1 \\ X & 0 & X \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} X & 1 & X \\ 1 & 1 & 1 \\ X & 1 & X \end{bmatrix}$
结果讨论	孔隙只有 1 个孤立像素点，周长应为4个像素长度。	卷积区域的中心元素属于孔隙区域的边界点。周长应为3个像素尺寸长度。	卷积区域的中心元素属于孔隙区域的边界点。周长应为2个像素尺寸长度。	卷积区域的中心元素属于孔隙区域的边界点。周长应为1个像素尺寸长度。	卷积区域的中心元素属于孔隙区域的边界点。周长应为0个像素尺寸长度。

图 7 卷积结果分类讨论

Fig.7 Discussion for convolutional result classification

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表4 可见光图像孔隙特征参数实际值统计结果
Tab.4 Statistical results of actual values of pore characteristic parameters in visible light images

图像序号	实际层厚 /mm	实际周长 /mm	实际面积 /mm²	圆度
11	0.18	0.651 2	0.018 22	0.539 9
12	0.21	1.546 6	0.104 36	0.548 3
13	0.24	1.953 6	0.119 27	0.392 7
14	0.27	1.709 4	0.102 70	0.441 7
15	0.30	1.221 0	0.051 35	0.432 8
16	0.33	0.814 0	0.028 16	0.534 1
17	0.36	0.162 8	0.001 66	0.787 1

表 5 CT 图像孔隙特征参数实际值统计结果
Tab.5 Statistical results of actual values of pore characteristic parameters in CT images

图像序号	实际层厚 /mm	实际周长 /mm	实际面积 /mm²	圆度
8	0.20	0.480	0.009 54	0.520 3
9	0.225	1.366	0.038 51	0.259 3
10	0.25	1.403	0.052 14	0.332 9
11	0.275	1.403	0.060 66	0.387 2
12	0.30	1.329	0.062 02	0.441 2
13	0.325	1.292	0.058 95	0.443 6
14	0.35	1.255	0.057 25	0.456 6
15	0.375	1.181	0.048 05	0.432 6
16	0.40	0.738	0.023 51	0.541 8

2.2 可见光图像与 CT 图像特征参数对比分析

可见光图像代表孔隙在未受到后续成形影响时的结果，而 CT 图像则代表孔隙在受到后续打印成形影响后的结果，通过对比两种图像中的孔隙特征参数随层厚的变化，分析 N+1 层的成形对第 N(或及以下)层孔隙的影响。根据表 4 与表 5，标出目标孔隙所在层厚位置，如图 8(a)所示。

可见光图像与 CT 图像目标孔隙的周长随层厚变化如图 8(b)所示，目标孔隙的周长在孔隙演变的前半部分为可见光图像中的周长大于 CT 图像中的周长，而后半部分则是 CT 图像中目标孔隙的周长大于可见光图像中的周长，两者大约在层厚 0.29 mm 处交汇。可见光图像中的孔隙比 CT 图像中的孔隙更先出现，也比 CT 图像中的孔隙更早湮灭。

可见光图像与 CT 图像目标孔隙面积随层厚变化如图 8(c)所示。在前半部分，可见光图像中目标孔隙的面积大于 CT 图像中的目标孔隙面积，后半部分 CT 图像的目标孔隙面积大于可见光图像中目标孔隙的面积，二者同样是在层厚 0.29 mm 左右相交。同样，可见光图像中比 CT 图像中的孔隙更早出现，也比 CT 图像中的孔隙更早湮灭，可见光图像中孔隙消失后，CT 图像中的孔隙仍会在后续的打印层出现。

从图 8(b~c)中可以发现，在孔隙存在的前半部分，可见光图像中孔隙周长与面积较 CT 图像更大，在孔隙后半部分，可见光图像中孔隙的周长与面积较 CT 图像更小，表明孔隙形成的前半部分，第 N+1 层的成形对第 N(或及以下)层孔隙具有缩小作用，后半部分具有扩大作用。

可见光图像中比 CT 图像中的孔隙更先出现，同时比 CT 图像中的孔隙更先湮灭，可见光图像中

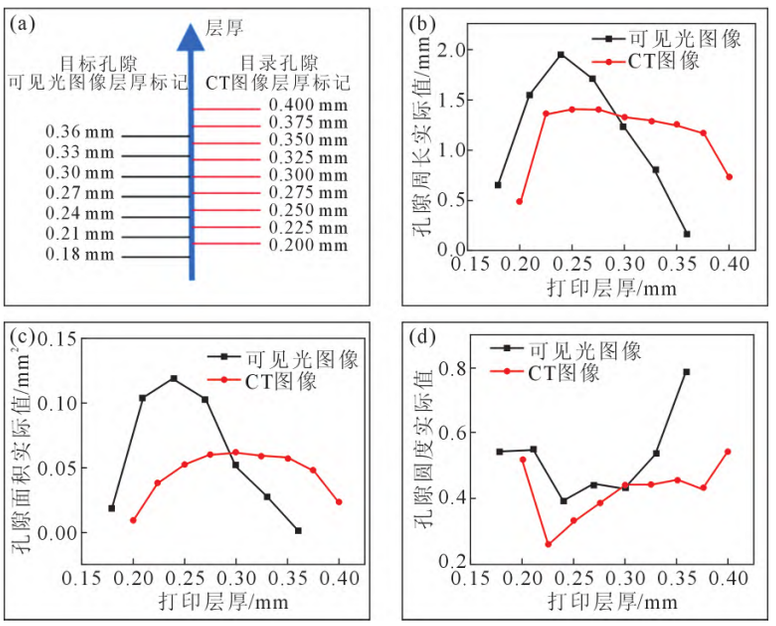

图 8 可见光图像与 CT 图像目标孔隙特征参数随层厚变化图：(a) 层厚示意图，(b) 孔隙周长变化图，(c) 孔隙面积变化图，(d) 孔隙圆度变化图

Fig.8 Variation in target pore characteristic parameters with layer thickness in visible light images and CT images: (a) Schematic diagram of layer thickness, (b) variation in pore perimeter, (c) variation in pore area, (d) variation in pore roundness

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

孔隙消失后，CT图像中的孔隙仍会在后续的打印层出现，但此时CT图像中的孔隙也将消失，表明CT图像中的孔隙相较于可见光图像中的孔隙变化有滞后。

可见光图像与CT图像目标孔隙圆度随层厚变化如图8(d)，目标孔隙圆度随层厚在可见光图像与CT图像中的变化趋势均为先下降，后上升。可见光图像与CT图像中，孔隙的圆度均为整体两边高，中间低，因为两边是孔隙的形成与湮灭阶段，孔隙较小，接近粉粒尺度，形貌趋于圆形，因此圆度较大。而中间部分，孔隙较大，远大于粉粒尺度，孔隙易于形成其他形貌，因此圆度较小。可见光图像中孔隙的圆度整体大于CT图像中孔隙圆度，表明第N+1层的成形具有减小第N(或及以下)层孔隙圆度的作用。

3　结论

(1)可见光图像中的孔隙出现与湮灭的所在层厚均小于CT图像，表明CT图像孔隙特征参数随层厚变化滞后于可见光图像。

(2)在孔隙存在的前半部分，可见光图像中孔隙周长与面积较CT图像更大，表明第N+1层的成形对第N(或及以下)层孔隙具有缩小作用，在孔隙存在的后半部分，可见光图像中孔隙的周长与面积较CT图像更小，表明第N+1层的成形对第N(或及以下)层孔隙具有扩大作用。

(3)可见光图像中孔隙的圆度整体大于CT图像中孔隙圆度，表明第N+1层的成形作用使得第N(或及以下)层孔隙的圆度有所减小。

参考文献：

[1] WU B, JI X, ZHOU J, et al. In situ monitoring methods for selective laser melting additive manufacturing process based on images — A review[J]. China Foundry, 2021, 18(4): 256-285.

[2] 陶攀，李怀学，许庆彦，等. 激光选区熔化工艺过程数值模拟的国内外研究现状[J]. 铸造，2017, 66(7): 695-701.
TAO P, LI H X, XU Q Y, et al. Research status of numerical simulation of selective laser melting process at home and abroad[J]. Foundry, 2017, 66(7): 695-701.

[3] TAPIA G, ELWANY A. A review on process monitoring and control in metal-based additive manufacturing[J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering. 2014, 136(6): 60801.

[4] 王红军. 增材制造的研究现状与发展趋势[J]. 北京信息科技大学学报(自然科学版). 2014, 29(3): 20-24.
WANG H J. Research status and development tendency of additive manufacturing[J]. Journal of Beijing Information Science & Technology University, 2014, 29(3): 20-24.

[5] 王黎. 选择性激光熔化成形金属零件性能研究[D]. 武汉：华中科技大学，2012.
WANG L. Research on the performance in selective laser melting of metallic part[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.

[6] 张安峰，李涤尘，梁少端，等. 高性能金属零件激光增材制造技术研究进展[J]. 航空制造技术，2016, 517(22): 16-22.
ZHANG A F, LI D C, LIANG S D, et al. Development of laser Additive manufacturing of high-performance metal parts[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 517(22): 16-22.

[7] 王磊，卢秉恒. 我国增材制造技术与产业发展研究[J]. 中国工程科学，2022, 24(4): 202-211.
WANG L, LU B H. Development of additive manufacturing technology and industry in China[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24 (4): 202-211.

[8] 李军，刘婷婷，廖文和，等. 激光选区熔化GH3536高温合金成形特征与缺陷研究[J]. 中国激光，2023, 50 (12): 211-220.
LI J, LIU T T, LIAO W H, et al. Forming characteristics and defects of GH3536 superalloy by selective laser melting[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50 (12): 211-220.

[9] XIA M, GU D, YU G, et al. Porosity evolution and its thermodynamic mechanism of randomly packed powder-bed during selective laser melting of Inconel 718 alloy[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2017, 116: 96-106.

[10] 段伟，殷亚军，周建新，等. 钛合金TC4激光熔覆成形的数值模拟研究[J]. 热加工工艺，2018, 47(16): 155-159.
DUAN W, YIN Y J, ZHOU J X, et al. Numerical simulation study on laser cladding forming of TC4 titanium alloy[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(16): 155-159.

[11] BAYAT M, THANKI A, MOHANTY S, et al. Keyhole-induced porosities in laser-based powder Bed fusion(L-PBF) of Ti6Al4V: High-fidelity modelling and experimental validation[J]. Additive Manufacturing, 2019, 30: 100835.

[12] 徐晓静. 基于机器视觉的激光选区熔化铺粉缺陷自动检测与分类研究[D]. 武汉：华中科技大学，2021.
XU X J. Research on automatic detection and classification of defects of SLM powder Bed based on machine vision[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021.

[13] 伍缘杰，徐晓静，计效园，等. 基于图像处理的SLM铺粉缺陷检测识别与分类研究 [J]. 特种铸造及有色合金，2023, 43(1): 23-28.
WU Y J, XU X J, JI X Y, et al. Defect recognition and classification of SLM powder spreading based on image processing[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(1): 23-28.

[14] GUO L, WANG H, LIU H, et al. Understanding keyhole induced-porosities in laser powder bed fusion of aluminum and elimination strategy[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2023, 184: 103977.

[15] FORIEN J, CALTA N P., DEPOND P J, et al. Detecting keyhole pore defects and monitoring process signatures during laser powder bed fusion: A correlation between in situ pyrometry and ex situ X-ray radiography[J]. Additive Manufacturing, 2020, 35: 101336.

[16] ZHAO C, PARAB N D ,LI X , et al. Critical instability at moving keyhole tip generates porosity in laser melting[J]. Science, 2020, 370(6520): 1080-1086.

[17] JOST E W, MIERS J C, ROBBINS A, et al. Effects of spatial ener-

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

gy distribution-Induced porosity on mechanical properties of laser powder Bed fusion 316 L stainless steel[J]. Additive Manufacturing, 2021: 101875.

[18] HUANG Y Z, FLEMING T G, CLARK S J, et al. Keyhole fluctuation and pore formation mechanisms during laser powder bed fusion additive manufacturing[J]. Nature Communications, 2022, 13 (1), 1170.

[19] WANG X, ZHAO L P, FU J Y H, et al. Effects of statistical pore characteristics on mechanical performance of selective laser melted parts: X-ray computed tomography and micromechanical modeling[J]. Materials Science & Engineering: A, 2022, 834: 142515.

[20] PANDIYAN V, MASINELLI G, CLAIRE N , et al. Deep learning-based monitoring of laser powder bed fusion process on variable time-scales using heterogeneous sensing and operando X-ray radiography guidance[J]. Additive Manufacturing, 2022, 58: 103007.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net