

金属粉末床熔融工艺在线监测技术综述

赵德陈^{1,2,3} 林峰^{1,2,3}

1. 清华大学机械工程系, 北京, 100084

2. 先进成形制造教育部重点实验室, 北京, 100084

3. 生物制造与快速成形技术北京市重点实验室, 北京, 100084

摘要:金属粉末床熔融技术是近年来迅速发展起来的一种先进制造技术,在航空航天、生物医疗、汽车等领域获得广泛关注,但工艺可重复性差和稳定性不足等缺点限制了该技术的进一步工业应用。在线监测技术能够及时探测成形状态和缺陷,消除上述工艺问题对该技术发展的限制。从铺粉过程监测、粉末床检测、熔融过程监测和熔融层检测等方面综述了金属粉末床熔融工艺在线监测技术的研究现状,分析了现有技术的不足,总结了其今后的发展趋势。

关键词:金属增材制造;粉末床熔融;在线监测;研究现状;发展趋势

中图分类号:V216;TP216

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2018.17.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



A Review of On-line Monitoring Techniques in Metal Powder Bed Fusion Processes

ZHAO Dechen^{1,2,3} LIN Feng^{1,2,3}

1. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084

2. Key Laboratory for Advanced Materials Processing Technology, Ministry of Education of China, Beijing, 100084

3. Bio-manufacturing and Rapid Forming Technology Key Laboratory of Beijing, Beijing, 100084

Abstract: The metal powder bed fusion was an advanced and promising manufacturing technique which was rapidly developed in recent years. The extensive attentions in the fields of aerospace, biomedicine and automotive were obtained, but shortcomings such as poor process repeatability and insufficient stability were still restricting its further industrial applications. On-line monitoring provided an effective solution for these obstacles by monitoring process statuses and defects in time. The research statuses of on-line monitoring for metal powder bed fusion were reviewed from the aspects of powder recoating monitoring, powder bed inspection, building process monitoring and deposited layer inspection. Then, limitations of present online monitoring techniques were pointed out, and some topics to be further studied were predicted.

Key words: metal additive manufacturing; powder bed fusion; on-line monitoring; research status; development trend

0 引言

增材制造是一种由数据驱动、逐层累加材料成形实体零件的先进制造技术,与传统的减材制造相比,该技术可成形轻量化、复杂结构和多材料梯度结构,工艺流程短、材料浪费少,且无需模具,支持个性化和定制化加工,已广泛应用于航空航天、生物医疗、汽车等领域^[1-3]。

根据送料方式的不同,金属增材制造分为熔覆沉积和粉末床熔融(选区熔化)技术两类^[4]。前者采用同步送粉或送丝的方式,在高速束扫描的同时向熔池区域填充原材料;后者采用预先在成形区域铺设粉末床的方式。金属粉末床熔融技术包括激光选区熔化(selective laser melting, SLM)技术和电子束选区熔化(electron beam selective melting, EBSM)技术。SLM技术采用激光束作为热源,具有较高的成形精度和表面光洁度;EBSM技术采用高能电子束作为热源,具有更快的成

形速度,且成形热应力小,可成形高熔点材料和脆性材料。

激光或电子束扫描粉末床,使之熔化沉积的过程,是一个多种物理场相互耦合、高度动态的复杂过程,成形件易产生诸如翘曲变形^[5-6]、球化^[7]、开裂^[8]等宏观缺陷,以及气孔^[9-13]、夹渣^[14]、未融合^[12,15]等内部冶金缺陷。对成形件缺陷的及时探测和抑制,可极大地提升金属粉末床熔融工艺的成形质量,消除工艺不稳定性对该技术发展的限制。

在线监测是指在工艺过程中对成形状态和缺陷进行及时探测的技术方法。一方面它能够为研究人员提供记录工艺过程的途径,辅助研究工艺机理和优化工艺参数;另一方面它能够对工艺过程进行实时监控和数据分析,既可为缺陷的在线诊断、探测和实时修复奠定基础,也可为工艺过程的文档化提供关键数据。因此,在线监测技术,尤其是针对金属增材制造工艺的在线监测技术,近年来已经成为一个研究热点。

采用粉末床熔融技术成形的零件尺寸小,对成形缺陷更为敏感,近年来针对该技术的主要工艺过程,世界各地的研究团队通过引入各种检测技术,探索了多种在线监测方法,虽然这些技术和方法目前大多还处于研发阶段,但已经显现出不可替代的技术潜力。本文以粉末床熔融工艺过程为线索,针对铺粉过程监测、铺粉后粉末床检测、熔融过程监测以及熔融后熔融层检测,综述当前的研究现状,分析现有技术的不足,探讨其今后的发展趋势。

1 铺粉过程监测

铺粉过程是指通过铺粉装置将粉末铺展在成形区域形成粉末床的过程,是粉末床熔融工艺过程的第一步,也是成形过程能够稳定运行的关键步骤之一。针对铺粉过程容易出现的故障和铺粉刮刀的异常损伤,REINARZ等^[16]在SLM设备的铺粉机构上安装压电式加速度计(图1a),通过测量铺粉机构在铺粉运动过程中的速度变化信号来监测铺粉过程,因为铺粉机构与上一层熔融层凸起产生碰撞时,会产生较大的振动甚至卡顿,加速度计的信号可以反映出铺粉运动的平稳性,同时也能反映熔融层的凹凸情况。KLESZCZYNSKI等^[17]利用光学检测结果验证了该监测系统的可靠性,如图1b和图1c所示。当激光功率过高使熔融层产生严重的凸起时,加速度计对熔融层凸起十分敏感,能够有效捕捉碰撞导致的速度变化信号。当监测到加速度值超过设定阈值时,系统自动中

断打印进程,避免铺粉刮刀的进一步损伤以及由此产生的大量缺陷。

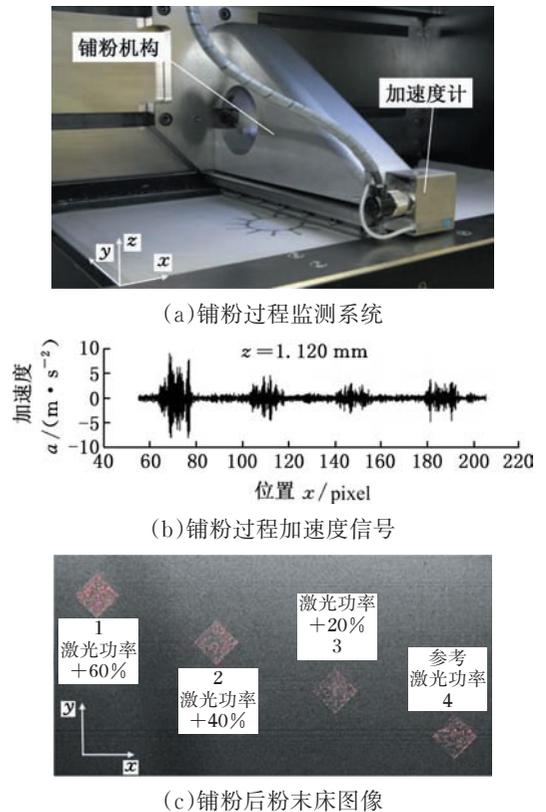


图1 基于加速度计的SLM工艺铺粉过程监测^[17]
Fig.1 Acceleration sensor based powder recoating monitoring^[17]

2 粉末床检测

铺粉后形成的粉末床是电子束或激光束扫描熔化粉末的基础,如果粉末床不平整,将造成扫描过程熔池的不稳定,产生异常凸起或孔隙等缺陷,影响后续成形。造成粉末床不平整的原因有很多,如:①粉刷的磨损和损坏,造成粉末床产生沿着铺粉方向分布的沟壑或隆起;②熔融层凸起,刮刀在凸起处受力跳动,产生垂直于铺粉方向的沟壑或隆起;③粉末量不足,粉末末端没有填充粉末。因此,粉末床的形貌不仅可以反映铺粉装置的工作状态,还可以反映上一层熔融沉积的质量。粉末床形貌监测目前主要有两种方式:对粉床光学图像进行灰度纹理分析;利用低相干干涉测量高度分布。

图2为SLM工艺中对粉末床进行可见光检测的系统示意图,包含一个光学相机和若干个闪光光源。该系统采用离轴式的布置方案,相机从侧向对准粉末床,同时闪光光源呈不同角度倾斜布置。闪光光源的作用是提供适当的背景光线,以便能够拍摄出清晰、高对比度的粉末床图像,简化后续的缺陷识别过程。CRAEGHS等^[18]从粉末床

灰度图像上提取多条垂直于铺粉方向的灰度分布,并取平均分布与合理灰度范围对比,有效鉴别出由于粉刷磨损和局部损坏导致的粉末床不均匀(图3)。KLESZCZYNSKI等^[17,19]依据熔融层上凸起镜面反射产生亮区的特点,对灰度图像进行阈值处理,实现了对凸起位置和面积的有效提取(图4);JACOBSMÜHLEN等^[20]通过该方法研究了悬空结构角度变化和支撑结构参数对熔融层凸起的影响。ABDELRAHMAN等^[21]从粉末床图像上提取与零件截面相对应的区域并叠加形成三维粉末床模型,该模型能够很好地反映出粉末床异常对应于零件的三维空间位置。

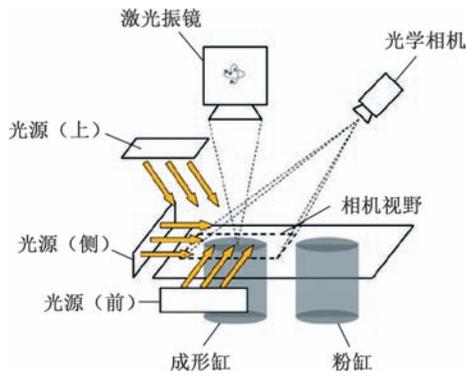
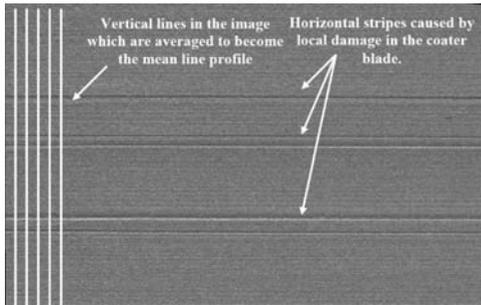
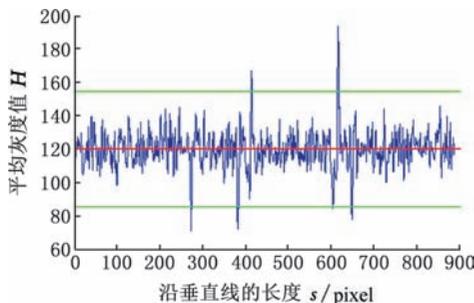


图2 SLM工艺光学检测系统示意图^[18]

Fig.2 Schematic of optical inspection system in SLM^[18]



(a)不平整粉末床图像

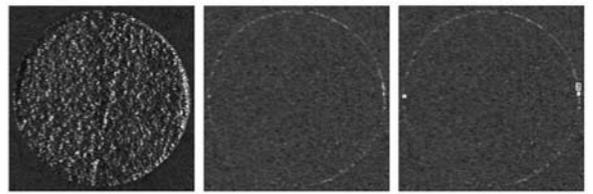


(b)沿垂直线的平均灰度分布

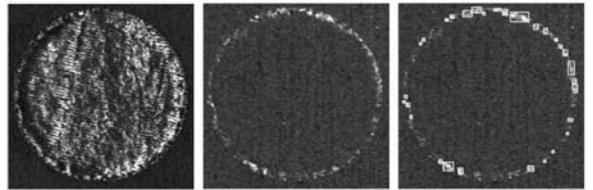
图3 基于灰度分布的粉末床异常识别^[18]

Fig.3 Anomaly recognition of powder bed based on gray value distribution^[18]

NEEF等^[22]提出利用低相干干涉成像技术来检测SLM工艺中粉末床的平整性。如图5所示,低相干干涉成像的原理是利用测量激光束扫描粉末床,通过光谱仪测量反射光和参考光之间的光



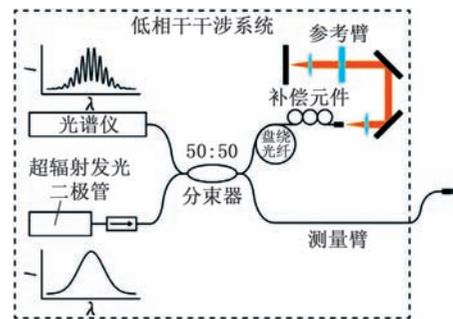
(a)参考激光功率



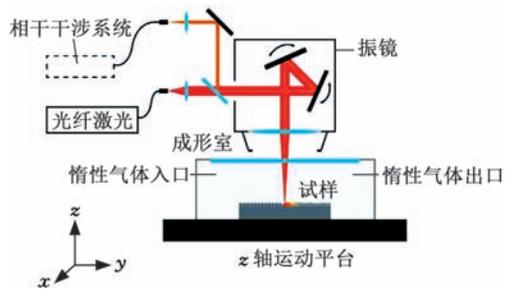
(b)增加40%激光功率

图4 基于粉末床形貌的熔融层凸起检测^[19]

Fig.4 Elevated area detection based on powder bed morphology^[19]



(a)低相干干涉系统



(b)SLM粉末床检测系统

图5 基于低相干干涉技术的SLM粉末床检测系统示意图^[23]

Fig.5 Coaxial powder bed inspection system with inline coherent imaging technique in SLM^[23]

程差,再补偿由于角度偏转造成的偏差,获得不同扫描点的高度分布。由图6可知,利用低相干干涉技术能够有效探测粉末床的高低起伏,可识别粉末床上50 μm深度的沟槽^[22]。

上述光学检测均针对SLM工艺,在EBSM工艺中应用很少。基于光学成像的监测方法对传感器和光源的相对位置要求较高,需对成形设备进行相应改造,增大了系统集成的难度。由于SLM工艺成形室内填充了惰性气体,有效抑制了金属蒸镀并改善了散热条件,传感器可直接置于成形室内,因此系统集成相对简单,而EBSM工艺在真

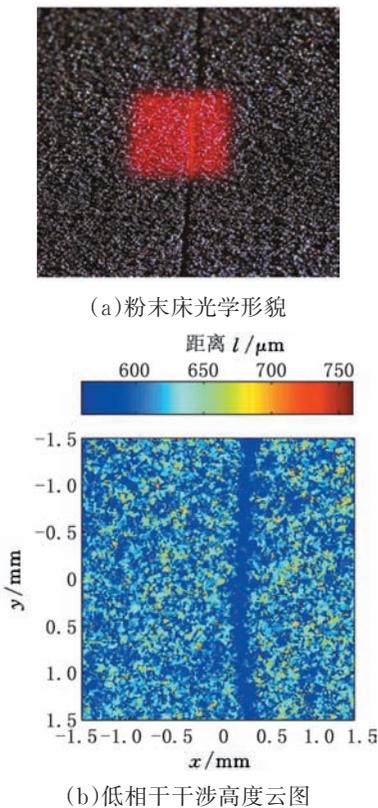


图6 基于低相干干涉成像的SLM工艺粉末床检测^[22]

Fig.6 Powder bed inspection using inline coherence interference imaging in SLM^[22]

空环境下进行,具有更严重的金属蒸镀现象、更高的环境温度和高强度的辐射,限制了上述检测方法的应用。

3 熔融过程监测

在熔融过程中,高能电子束或激光束扫描粉末床,使粉末熔化产生熔池,凝固后沉积形成实体截面,因此熔融沉积过程直接决定了最终熔融层的质量。目前对熔融过程的监测主要是针对熔池和整个成形区域的温度场。

3.1 熔池监测

粉末床熔融工艺中的熔池是由激光束或电子束扫描粉末床,熔化粉末而形成,具有尺寸小、移动速度快的特点。熔池的形态、尺寸、温度等状态在很大程度上决定着成形件的质量。熔池监测是指在激光或电子束扫描过程中对熔池辐射强度和形状特征进行实时测量,并对测量数据进行实时分析,识别与熔池行为相关的球化、翘曲等成形缺陷。

SLM熔池监测系统通常采用同轴布局,如图7所示,传感通道与成形激光束通道重叠,这样无需增加复杂的熔池跟踪系统就可实时获取熔池信号。高功率成形激光束在45°半反射镜表面反射后进入SLM扫描系统,而熔池辐射信号沿着相反方向传播,透过半反射镜后,通过滤波片筛选出特

定波段信号进入传感器,或通过分光镜分成两束,供传感器采集。KRUTH课题组^[18,24-26]采用上述同轴传感方式,筛选780~950 nm波段的辐射光波并分束,一束光用于光电二极管采集熔池光强信号;另一束光则经由高速CMOS相机成像,用于提取熔池的面积、长度和宽度等几何信息。实验研究表明光电二极管采集的熔池光强与熔池面积成正比,而二者都能够有效地侦测出悬空结构成形时产生的球化、U形扫描时转角处的凸包以及铺粉故障等工艺问题。该课题组以激光功率为控制对象,分别将光电二极管的输出电压和熔池像素面积作为反馈变量,建立了SLM工艺闭环控制系统,研究结果表明上述两种闭环控制系统均能有效提高成形悬空面结构时的精度和实现工艺参数的自适应。

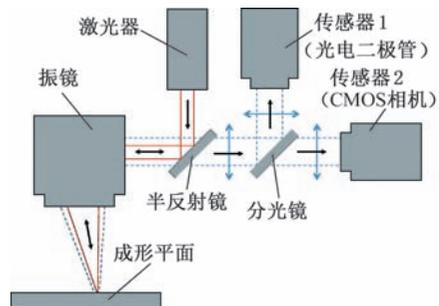
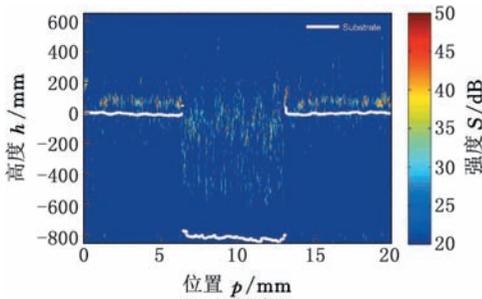


图7 SLM工艺熔池监测系统布置示意图

Fig.7 Schematic of the molten pool monitoring system in SLM

PAVLOV等^[27]同样采取同轴布置方案,采用双色高温计实时测量激光扫描过程中熔池的温度信号,发现双色高温计的测量值对填充间距、铺粉厚度、填充策略等工艺参数十分敏感,能够检测出由于粉末床厚度不均匀导致的熔池异常。KANKO等^[23]则将同轴光路应用于低相干干涉测量,实时测量SLM成形过程熔池的高度变化。如图8所示,当激光束扫过悬空区域时,熔池由于散热条件变差而产生过热现象,从而剧烈波动,低相干干涉技术可以快速捕捉熔池的高度变化,识别出由于过热导致的球化缺陷。

为了便于缺陷识别和定位,CLIJSTERS等^[25]将熔池像素面积根据扫描位置顺序排列成二维图像,将时序信号转化为空间分布的图像(图9)。通过试验方式分别获取填充扫描、轮廓扫描时稳态熔池的几何参数,并将其作为参考数据,选取包含95%参考数据点的区间作为合理参数范围,实现了对熔池异常的识别。此外,通过逐层获取位置相关的熔池面积分布,实现了对成形件内部孔隙缺陷的三维空间定位,缺陷识别和定位的结果与CT结果对应良好。



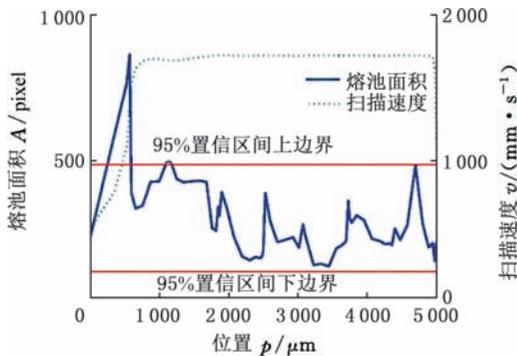
(a)扫描过程熔池信号



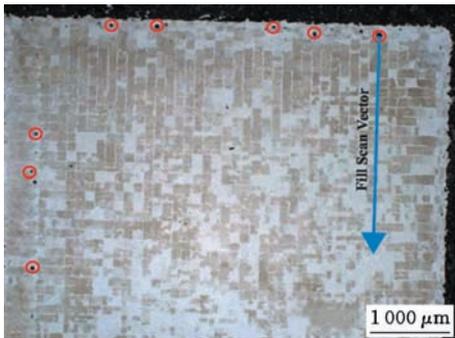
(b)单熔道光学形貌

图8 基于低相干干涉技术的SLM单道熔池监测^[23]

Fig.8 Molten pool monitoring when processing a single track with low coherence interference in SLM^[23]



(a)熔池面积信号



(b)熔池面积分布

图9 熔池信号可视化研究^[25]

Fig.9 Visualization of molten pool signal^[25]

KRAUSS等^[28]采用离轴的传感器布置方式,将红外热像仪从SLM设备的前观察窗口侧向对准成形区域,在成形激光束扫描过程中拍摄热像图片,通过对红外热像图片进行处理,实现了对熔池面积、长宽比以及圆度等几何参数的提取,并研究了扫描速度、激光功率、填充间距、填充线长度以及铺粉厚度等工艺参数对熔池几何参数的影响。

上述对熔池的监测基本采用同轴系统,且用于SLM工艺。因同轴监测系统能够对熔池进行很好的跟踪,且输出信号简单,目前已实现实时工艺监测和反馈控制。而在EBSM工艺中由于电磁偏转系统等结构限制,只能采用离轴的布置方式,

对熔池的快速跟踪成为难题,加上严重的蒸镀影响,对熔池的实时监测实现起来具有一定的难度。

3.2 温度场监测

粉末床熔融是一种热加工过程,记录和分析粉末床的温度场及其变化历程,对理解工艺内在机理和验证仿真模型具有重要价值。PRICE等^[29]利用近红外热成像设备研究了EBSM工艺预热扫描、轮廓扫描、填充扫描等阶段成形区域温度分布的演变。CHENG等^[30]和PRICE等^[31]研究了扫描速度、电子束束流以及束斑直径等工艺参数对熔池纵向(沿着扫描方向)温度分布和熔池尺寸的影响,并利用测量的温度分布和熔池尺寸验证了仿真模型。此外,PRICE等^[32-33]探究了成形高度对熔池纵向温度分布的影响以及悬空面上与熔池中心线不同距离处的纵向温度分布,发现在填充扫描过程中熔池纵向温度分布具有很好的重复性,且对散热条件十分敏感,验证了基于温度空间分布的缺陷识别的可行性。

内部空隙等缺陷会减弱局部区域的散热能力,改变其周围温度场的分布和演变特性。据此,KRAUSS等^[28]提出了利用温度场检测实现内部空隙缺陷侦测的方法,在激光束扫过预设缺陷区域时,提取沿着熔池纵向的温度分布曲线。与无缺陷时的温度分布曲线对比发现,熔池后端的温度分布曲线在缺陷位置处存在明显的差异,而且与缺陷尺寸相关。因此利用粉末床温度场的动态数据不仅可以识别孔隙缺陷,还可以获得缺陷大小等信息。

此外,KRAUSS等^[28,34-35]尝试了基于温度场时域演变的缺陷甄别,且从动态温度场演变数据中提取了相关的关键指标,包括高温保持时间、等效热扩散系数、最高温度和飞溅量等,其中等效热扩散系数是按一维向下热扩散简化模型定义的降温速率。每层温度场演变提取的指标都可形成一帧指标分布图。待成形结束后,将各层的分布图堆叠形成三维指标分布模型。图10显示了从等效热扩散系统和高温保持时间的三维指标分布模型中提取的穿过缺陷的垂直剖面,可以直观地发现这两个指标在缺陷位置上方均发生了明显改变,说明缺陷上方的热扩散能力会下降,而降温速度会减慢,这一现象能够用于甄别缺陷。

在组织预测方面,PRICE等^[31]根据温度-时间演变曲线,提取了在不同扫描速度下成形截面的平均冷却速率,发现快速扫描产生较高的冷却速率和较小的 β 柱状晶。RAPLEE等^[36]针对EBSM工艺成形过程中不同的扫描策略(点扫描和线

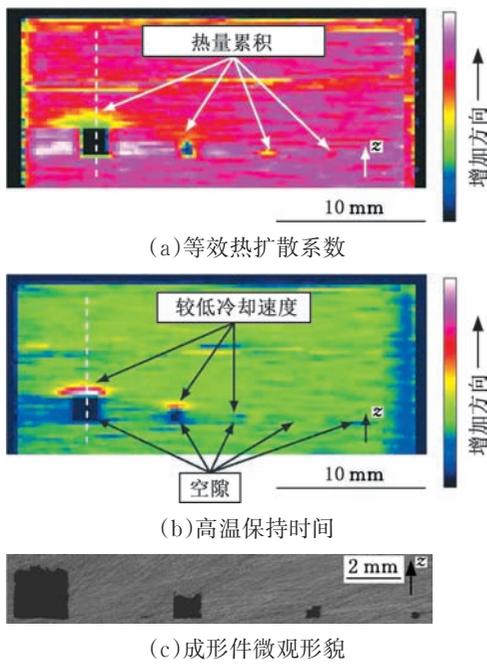


图 10 缺陷对等效热扩散系数和高温保持时间分布的影响^[34]

Fig.10 Effect of artificial flaws on thermal diffusivity and time above T^* ^[34]

扫描,如图 11 所示),利用红外热成像获取的动态温度场分布图像,提取不同位置处的温度梯度和固液界面移动速度。通过与实验对比发现,线扫描策略会形成较高的温度梯度和较低的固液界面移动速度,倾向于形成柱状晶;而点扫描策略会形成较低的温度梯度和较高的固液界面速度,有利于等轴晶成形(图 12)。上述研究表明利用热成像手段对成形件微观组织形态进行预测,有助于在增材制造成形过程中实现对制件组织的灵活制备和有效控制。

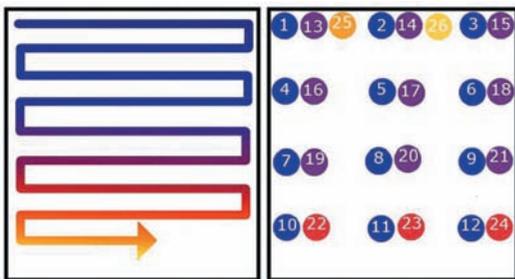
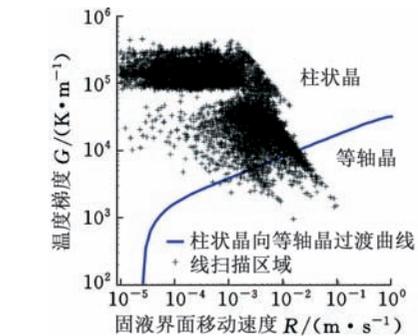
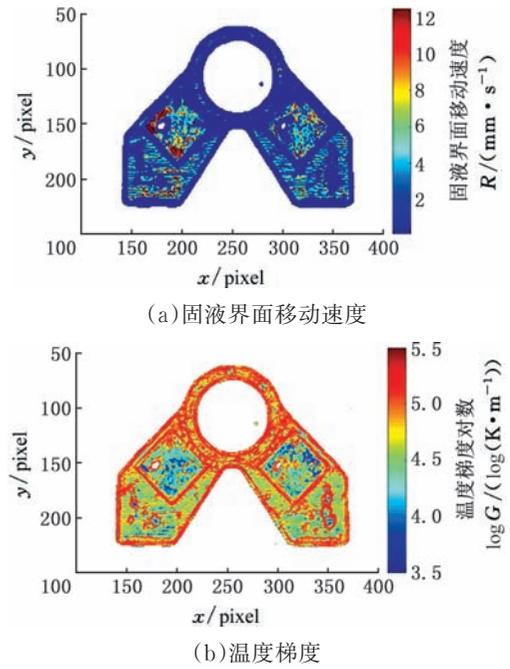


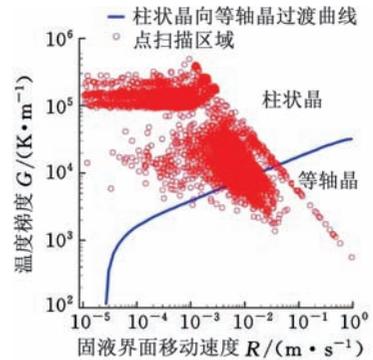
图 11 EBSM 工艺线扫描(左)和点扫描(右)策略示意图^[36]

Fig.11 A graphical representation of the line melt (left) and point melt (right) scan strategies^[36]

对粉末床熔融工艺的动态温度场进行实时采集和分析,已在内部缺陷探测和微观组织预测方面取得了较大进展,但仍存在许多限制。由于动态温度场信息主要来自于红外或近红外热成像仪,而这些热成像仪设备的时间分辨率和空间分辨率尚显不足,因此导致当前缺陷检测的精度和



(c) 线扫描策略下晶粒形态分布



(d) 点扫描策略晶粒形态分布

图 12 EBSM 扫描策略对晶粒形态的影响^[36]

Fig.12 Influence of scan strategies on grain morphology in EBSM^[36]

灵敏度不高。另外,粉末床熔融过程存在蒸镀现象,尤其是EBSM工艺,金属蒸汽会导致观察窗口透射率发生明显变化,不利于连续动态温度场监测。虽然学者们研究了防蒸镀系统和透射率补偿方法等,并取得了一定效果,但仍然无法完全消除蒸镀的影响^[37-38]。此外,为了将热像仪输出的辐射强度值转化为绝对温度,需要对材料红外发射率、窗口透射率以及环境温度等参数进行准确测定,这

也给温度场实时测量带来了难度和挑战^[29,38-41]。

此外,还有研究人员^[42-44]利用超声探测技术来监测成形过程中工件内部缺陷和孔隙率。

4 熔融层检测

粉末床经电子束或激光束熔融沉积后形成熔融层,熔融层的状态不仅反映了激光/电子束熔融沉积的质量、工艺参数的匹配优劣和设备运行状态,还会影响后续铺粉、熔融等成形过程,因此针对熔融层的检测,是在线监测技术中十分重要的一环,可以对截面轮廓、几何参数和表面缺陷进行检测,同时还可记录每层的成形结果,为最终的质量追溯提供基础数据。目前熔融层检测的主要对象是熔融层的温度场和形貌。

4.1 温度场检测

熔融层温度场检测与熔融沉积过程温度场检测类似,均采用近红外/红外热像仪,所不同的是熔融层温度场的变化速度较慢,通常只对熔融层温度场进行一次拍摄,利用单帧图像进行零件轮廓的提取和缺陷识别。

SCHWERDTFEGER等^[45]在EBSM工艺中选用不同的聚焦偏置参数作为对照,将熔融层热像图与金相图对比,发现热像图能有效揭示成形层内部未熔合、夹杂缺陷。DINWIDDIE等^[37]利用红外热成像系统研究EBSM工艺聚焦参数对悬空面上后续熔融层孔隙率的影响及孔隙率的演变过程。RODRIGUEZ等^[39]利用温度分布直方图对熔融层温度分布的不均匀性进行量化,发现过热区域的温度分布范围更广,认为基于直方图分析是一种有效识别局部过热缺陷的方法。RIDWAN等^[46]通过图像处理实现了对工件截面的提取,并统计了熔融层孔隙率来表征工艺质量。MIRELES等^[47]借助红外热成像监测来验证在线缺陷修复的可行性,对比熔融层重熔前后的热像图发现,重熔有效消减了孔隙缺陷,作者也据此提出局部缺陷在线修复的闭环控制路线。

上述研究主要论证了利用近红外/红外热成像技术进行熔融层缺陷检测的可行性,基于该技术的实时熔融层检测还需要进一步研究。

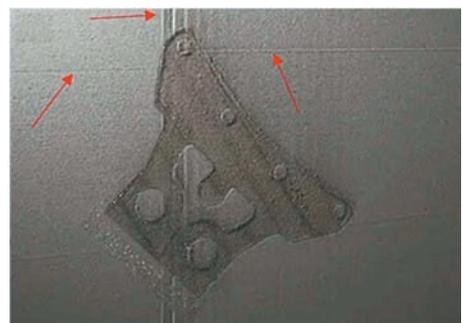
4.2 形貌检测

对熔融层形貌的监测除了可以利用前述粉末床的检测技术,如可见光成像和低相干干涉技术等,也可以利用电子光学成像技术。

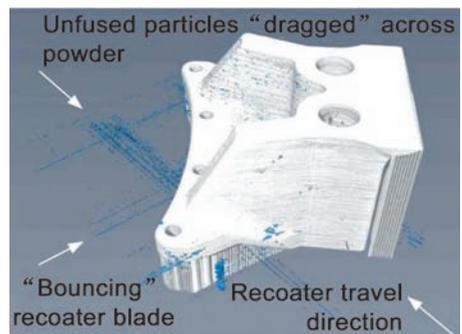
4.2.1 光学检测

前述粉末床的检测技术,如可见光成像和低相干干涉技术等,也可应用于熔融层形貌的检测。FOSTER等^[6]从熔融层光学图像中提取轮廓,并

将其堆叠形成三维实体模型,该三维模型除了包含成形件的尺寸信息外,还直观揭示了粉末床不平整问题(图13)。ABDELRAHMAN等^[21]在每一层扫描后拍摄五张不同照明条件下的熔融层图像,结合零件CAD模型提取熔融层的轮廓,对前后三层熔融层轮廓进行平均并分割图像获得熔融层截面,逐层堆叠截面获得三维实体模型,并将至少相邻两个熔融层上相同位置处出现的异常作为真实缺陷,实现了对实体零件内部未熔合、孔隙等缺陷的识别和定位(图14)。DEPOND等^[12]利用低相干干涉检测技术研究填充策略对熔融层表面粗糙度的影响,监测在成形悬空结构时熔融层粗糙度的变化。如图15所示,对比高度分布图发现,



(a) 熔融层图像



(b) 三维重构模型及粉末床异常

图13 基于光学成像的熔融层检测^[6]

Fig.13 As-deposited layer inspection based on visual imaging^[6]



图14 SLM制件的三维重构模型^[21]

Fig.14 3D reconstruction of as-SLMed part^[21]

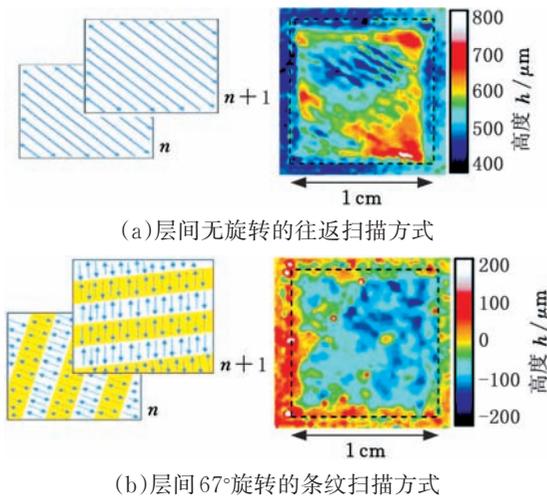


图15 利用低相干干涉技术研究扫描策略对熔融层形貌的影响^[12]

Fig.15 Investigation on the relation between scanning strategies and morphology of deposited layer with low coherence interference technique^[12]

在层间无旋转的往返扫描策略下熔融层具有更大的粗糙度,且高度分布具有明显方向性,随着熔融层起伏的逐层累积,最终造成工件的宏观变形。

此外,ERLER等^[48]提出了利用3D测绘技术测量熔融层表面高度分布的监测方式,通过测量激光束逐行扫描熔融层,利用激光位移传感器接收反射信号并计算出不同位置的高度,统计熔融层高度分布的标准差来评判熔融层质量,研究了铺粉参数和激光功率对熔融层平均层厚和均匀性的影响。

利用可见光成像技术监测熔融层的难点在于对灰度图像的分析处理,目前已实现轮廓提取和缺陷识别,但是该技术大多采用离线处理方式,实时性不强;而低相干干涉成像和3D形貌测绘输出为熔融层的高度分布,降低了数据分析和处理的难度,它的问题是需要进行逐点或逐行扫描,增加了SLM工艺的时间成本,而且由于检测系统复杂,目前直接测量高度分布的检测研究不多。

4.2.2 电子光学检测

电子光学检测是一种独特的用于监测EBSM工艺熔融层形貌的技术,它的原理是在逐层扫描结束后,利用小束流电子束逐点扫描熔融层,采集作用过程中产生的携带形貌信息的二次电子和背散射电子等电信号,将其按照扫描点序排列成二维灰度图像,该图像即可反映熔融层的形貌信息。图16为EBSM设备中电子探测器的布置示意图,现有研究中电子探测器通常置于电子枪下方,成形平台上方,并与电子枪同轴。由于高蒸镀、强辐射以及高温等恶劣环境影响,因此通常选用金属平板作为探测器。

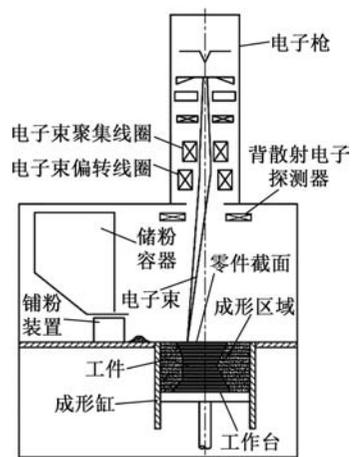
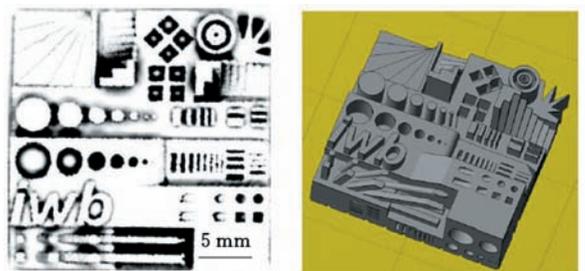
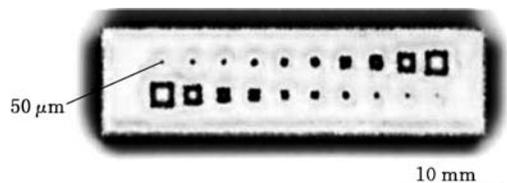


图16 EBSM设备中电子探测器布置示意图
Fig.16 Schematic of electron detector in EBSM machine

利用电子光学成像来监测熔融层表面形貌,可以降低提取熔融层轮廓和识别缺陷的难度。由于粉末区域与实体区域的形貌差异,依据电子光学图像可以容易地将两者分离以提取熔融层截面,测量轮廓尺寸和进行模型三维重构;此外,亚微米孔隙区域发射的背散射或二次电子数量少,在电子光学图像上呈现为暗点,因此对孔隙的识别和定位也较为简单。JANSON等^[49]研究发现利用电子光学监测系统能够有效识别约50 μm的孔隙缺陷(图17)。WONG等^[50]利用电子光学图像分离粉床与熔融层,实现了对熔融层轮廓和尺寸数据的提取和几何误差分析。Körner课题组提取熔融层截面并堆叠,实现了对成形件的三维模型重构,此外通过图像分析测绘出了成形件内部孔隙分布,结果与CT数据和显微照片十分吻合^[51]。



(a)表面形貌



(b)缺陷

图17 EBSM成形件的电子光学检测^[49]

Fig.17 Electron optical inspection of as-EBSMed part^[49]

由于利用电子光学图像识别熔融层表面缺陷简单可靠,因此适宜作为及时反馈,构建快速工艺优化系统。Körner课题组将EBSM工艺电子束扫描速度作为控制变量,建立了基于被散射电子信号快速工艺优化系统,实现了对电子束扫描速度的快速优化^[51]。如图18所示,使用恒定的扫描速度纵向扫描工件截面,随着填充线长度的增加,熔融层产生大量孔隙,Körner课题组制定如下的反馈控制策略:利用电子光学图像识别孔隙缺陷,在第一个缺陷位置处减小扫描速度,并每隔20层进行一次上述过程,结果表明在第四次参数调整后,熔融层孔隙缺陷基本消失。

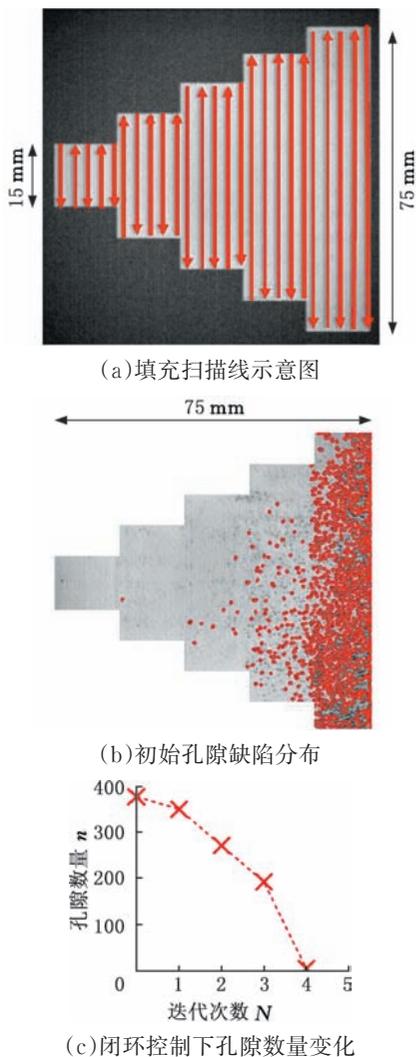


图18 基于电子光学检测的自动工艺参数调整^[51]

Fig.18 Automatic process adjustment based on electron optical inspection^[51]

电子光学监测有效克服了EBSM工艺中高温、高蒸镀和强辐射等困难,极大简化了在线监测和反馈控制的难度。虽然电子光学监测已经初步实现缺陷识别和反馈控制,但对于电子光学图像的分析解读仍需要进行大量的研究工作。此外,现有研究中电子光学图像对宏观形貌信息,如起伏、

粗糙度等不敏感,无法从中提取有效的宏观形貌信息,在宏观形貌检测上需要开展进一步的研究。

5 结语

激光选区熔化技术和电子束选区熔化技术在监测技术发展方面存在明显差异。前者在熔池动态监测、粉末床和熔融层的可见光检测上均发展迅速,且熔池动态监测已应用于工艺反馈控制;在电子束选区熔化工艺监测方面,光学监测技术均受到严格限制,但是电子光学成像技术开始成为一种有效手段,对电子束选区熔化工艺成形质量进行可靠的监测。

此外,笔者认为针对粉末床熔融工艺的在线监测具有如下发展趋势:

(1) 逐渐从监测表面状态,向监测内部缺陷和晶粒组织形态转变。早期粉末床熔融在线监测技术是通过测量熔池辐射强度,来实现对零件宏观形貌的监测。随着在线监测技术研究的不断深入,针对制件内部缺陷的在线监测已成为研究热点,并开始涉及到对晶粒组织的监测,这将为最终实现实时缺陷修复和组织控制奠定基础。

(2) 自动化和智能化。上述在线监测研究大部分采用离线的数据处理方式,且对监测结果的分析依赖于经验数据。随着研究的深入,通过引入计算机视觉、人工智能、数据挖掘等技术手段,提高对缺陷、孔隙等特征的识别准确性和效率,促进在线监测技术的进一步发展和应用。

(3) 多信息融合监测。利用多种监测方法监测工艺的不同阶段,根据不同监测数据综合判断成形过程的稳定性和缺陷信息,弥补单一测量方法的不足,避免单一信号指标的不确定性,实现对工艺过程的多传感信号、多物理信息的综合处理和判断,提高监测系统的准确性和可靠性。

(4) 主动式在线监测。常规的粉末床熔融工艺在线监测技术,尤其是基于光学成像的监测技术,受到照明条件、金属蒸镀、高温等诸多限制。主动式的监测技术,如应用于SLM工艺的低相干干涉技术、应用于EBSM工艺的电子光学成像技术,通过主动发射测量光束或电子束,降低对工作环境的要求,提高了测量系统的灵敏性、抗干扰能力和对工作环境的适应性,是未来粉末床熔融在线监测技术中较有前景的方向。

参考文献:

- [1] 郭超. 双金属电子束选区熔化增材制造系统的研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.

- GUO Chao. Research on Additive Manufacturing System of Dual Metals Electron Beam Selective Melting[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.
- [2] PATTERSON A E, MESSIMER S L, FARRINGTON P A. Overhanging Features and the SLM/DMLS Residual Stresses Problem: Review and Future Research Need[J]. *Technologies*, 2017, 5(2): 15.
- [3] 郭超, 张平平, 林峰. 电子束选区熔化增材制造技术研究进展[J]. *工业技术创新*, 2017, 4(4): 6-14.
GUO Chao, ZHANG Pingping, LIN Feng. Research Advances of Electron Beam Selective Melting Additive Manufacturing Technology[J]. *Industrial Technology Innovation*, 2017, 4: 6-14.
- [4] 闫占功, 林峰, 齐海波, 等. 直接金属快速成形制造技术综述[J]. *机械工程学报*, 2005, 41(11): 1-7.
YAN Zhangong, LIN Feng, QI Haibo, et al. Overview of Direct Metal Rapid Prototyping Manufacturing Technology[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2005, 41(11): 1-7.
- [5] GRASSO M, LAGUZZA V, SEMERARO Q, et al. In-process Monitoring of Selective Laser Melting: Spatial Detection of Defects via Image Data Analysis[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2017, 139(5): 051001.
- [6] FOSTER B, REUTZEL E, NASSAR A, et al. Optical, Layerwise Monitoring of Powder Bed Fusion[C]//Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, 2015: 10-12.
- [7] ZÄH M F, LUTZMANN S. Modelling and Simulation of Electron Beam Melting[J]. *Production Engineering*, 2009, 4(1): 15-23.
- [8] KAHNERT M, LUTZMANN S, ZAEH M. Layer Formations in Electron Beam Sintering[C]// Solid Freeform Fabrication Symposium. Muenchen, 2007: 88-99.
- [9] THIJS L, VERHAEGHE F, CRAEGHS T, et al. A Study of the Microstructural Evolution during Selective Laser Melting of Ti-6Al-4V[J]. *Acta Materialia*, 2010, 58(9): 3303-3312.
- [10] MURR L E, MARTINEZ E, GAYTAN S M, et al. Microstructural Architecture, Microstructures, and Mechanical Properties for a Nickel-Base Superalloy Fabricated by Electron Beam Melting[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2011, 42(11): 3491-3508.
- [11] CUNNINGHAM R, NARRA S P, OZTURK T, et al. Evaluating the Effect of Processing Parameters on Porosity in Electron Beam Melted Ti-6Al-4V via Synchrotron X-ray Microtomography[J]. *JOM*, 2016, 68(3): 765-771.
- [12] DEPOND P J, GUSS G, LY S, et al. In Situ Measurements of Layer Roughness during Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing Using Low Coherence Scanning Interferometry[J]. *Materials & Design*, 2018, 154: 347-359.
- [13] EVERTON S K, DICKENS P, TUCK C, et al. Identification of Sub-surface Defects in Parts Produced by Additive Manufacturing, Using Laser Generated Ultrasound[C]//Materials Science and Technology Conference and Exhibition. Salt Lake, 2016: 141-148.
- [14] CASATI R, LEMKE J, VEDANI M. Microstructure and Fracture Behavior of 316L Austenitic Stainless Steel Produced by Selective Laser Melting[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2016, 32(8): 738-744.
- [15] PUEBLA K, E. MURR L, M. GAYTAN S, et al. Effect of Melt Scan Rate on Microstructure and Macrostructure for Electron Beam Melting of Ti-6Al-4V[J]. *Materials Sciences and Applications*, 2012, 3(5): 259-264.
- [16] REINARZ B, WITT G. Process Monitoring in the Beam Melting Process – reduction of Process Breakdowns and Defective Parts [C]//Materials Science and Technology Conference and Exhibition. Pittsburgh, 2012: 9-15.
- [17] KLESZCZYNSKI S, ZUR JACOBSMÜHLEN J, Reinarz B, et al. Improving Process Stability of Laser Beam Melting Systems[C]//Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference. Berlin, 2014: 1-6.
- [18] CRAEGHS T, CLIJSTERS S, YASA E, et al. Online Quality Control of Selective Laser Melting [C]//Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, 2011: 212-226.
- [19] JACOBSMUHLLEN J Z, KLESZCZYNSKIT S, SCHNEIDER D, et al. High Resolution Imaging for Inspection of Laser Beam Melting Systems [C]//Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). New York: IEEE, 2013: 707-712.
- [20] JACOBSMÜHLEN J Z, KLESZCZYNSKI S, WITT G, et al. Elevated Region Area Measurement for Quantitative Analysis of Laser Beam Melting Process Stability [C]//26th International Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, 2015: 549-559.
- [21] ABDELRAHMAN M, REUTZEL E W, NASSAR A R, et al. Flaw Detection in Powder Bed Fusion Using Optical Imaging[J]. *Additive Manufacturing*, 2017, 15: 1-11.

- [22] NEEF A, SEYDA V, HERZOG D, et al. Low Coherence Interferometry in Selective Laser Melting[J]. *Physics Procedia*, 2014, 56: 82-89.
- [23] KANKO J A, SIBLEY A P, FRASER J M. In Situ Morphology-based Defect Detection of Selective Laser Melting through Inline Coherent Imaging[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 231: 488-500.
- [24] CRAEGHS T, BECHMANN F, BERUMEN S, et al. Feedback Control of Layerwise Laser Melting Using Optical Sensors [J]. *Physics Procedia*, 2010, 5: 505-514.
- [25] CLIJSTERS S, CRAEGHS T, BULS S, et al. In Situ Quality Control of the Selective Laser Melting Process Using a High-speed, Real-time Melt Pool Monitoring System [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 75 (5/8): 1089-1101.
- [26] KRUTH J P, MERCELIS P, VAN VAERENBERGH J, et al. Feedback Control of Selective Laser Melting[C]//*Proceedings of the 3rd International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping*. Leiria, 2007: 521-527.
- [27] PAVLOV M, DOUBENSKAIA M, SMUROV I. Pyrometric Analysis of Thermal Processes in SLM Technology[J].*Physics Procedia*, 2010, 5: 523-531.
- [28] KRAUSS H, ESCHEY C, ZAEH M. Thermography for Monitoring the Selective Laser Melting Process [C]//*Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*. Munchen, 2012: 999-1014.
- [29] PRICE S, COOPER K, CHOU K. Evaluations of Temperature Measurements by Near - infrared Thermography in Powder - based Electron - beam Additive Manufacturing [C]//*Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*. Austin: University of Texas, 2012: 761-773.
- [30] CHENG B, PRICE S, LYDON J, et al. On Process Temperature in Powder - bed Electron Beam Additive Manufacturing: Model Development and Validation [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2014, 136(6): 061018.
- [31] PRICE S, CHENG B, LYDON J, et al. On Process Temperature in Powder - bed Electron Beam Additive Manufacturing: Process Parameter Effects [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering—Transactions of the ASME*, 2014, 136 (6).
- [32] PRICE S, LYDON J, COOPER K, et al. Experimental Temperature Analysis of Powder - based Electron Beam Additive Manufacturing [C]//*Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*. Montreal, 2013: 162-173.
- [33] GONG X, CHENG B, PRICE S, et al. Powder-bed Electron Beam Melting Additive Manufacturing: Powder Characterization, Process Simulation and Metrology [C]//*Early Career Technical Conference*. Birmingham, 2013: 55-66.
- [34] KRAUSS H, ZEUGNER T, ZAEH M F. Thermographic Process Monitoring in Powder Bed Based Additive Manufacturing [J]. *AIP Conference*, 2015, 1650(1): 177-183.
- [35] KRAUSS H, ZEUGNER T, ZAEH M F. Layerwise Monitoring of the Selective Laser Melting Process by Thermography [J]. *Physics Procedia*, 2014, 56: 64-71.
- [36] RAPLEE J, PLOTKOWSKI A, KIRKA M M, et al. Thermographic Microstructure Monitoring in Electron Beam Additive Manufacturing [J]. *Sci. Rep.*, 2017, 7: 43554.
- [37] DINWIDDIE R B, DEHOFF R R, LLOYD P D, et al. Thermographic In-situ Process Monitoring of the Electron - beam Melting Technology Used in Additive Manufacturing[J]*SPIE Defence, Security and Sensing*, 2013, 23(5): 87050K.
- [38] PRICE S, LYDON J, COOPER K, et al. Temperature Measurements in Powder - bed Electron Beam Additive Manufacturing [C]//*ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. Montreal, 2014: V02AT02A002.
- [39] RODRIGUEZ E, MEDINA F, ESPALIN D, et al. Integration of a Thermal Imaging Feedback Control System in Electron Beam Melting [C]//*Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*. EI Paso, 2012: 945-961.
- [40] RODRIGUEZ E, MIRELES J, TERRAZAS C A, et al. Approximation of Absolute Surface Temperature Measurements of Powder Bed Fusion Additive Manufacturing Technology Using in-situ infrared Thermography [J]. *Additive Manufacturing*, 2015, 5: 31-39.
- [41] DINWIDDIE R B, KIRKA M M, LLOYD P D, et al. Calibrating IR Cameras for In-situ Temperature Measurement during the Electron Beam Melt Processing of Inconel 718 and Ti - Al6 - V4 [C]//*SPIE Defense and Commercial Sensing*. Baltimore, 2016: 418-421.
- [42] RIEDER H, DILLHÖFER A, SPIES M, et al. Ultrasonic Online Monitoring of Additive Manufacturing Processes Based on Selective Laser Melting [C]//*AIP Conference Proceedings*. Kaiserslautern, 2015: 184-191.

- [8] HO H, GIBSON I, CHEUNG W L. Effects of Energy Density on Morphology and Properties of Selective Laser Sintered Polycarbonate [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 89 / 90 (99): 204-210.
- [9] 徐大鹏, 周建忠, 郭华荣, 等. 覆膜陶瓷粉末的选择性激光烧结工艺研究及参数优化[J]. 航空精密制造技术, 2006, 42(6): 33-35.
XU Dapeng, ZHOU Jianzhong, GUO Huarong. Study of Selective Laser Sintering Technology of Polymer-coated Ceramic Powder and the optimization of Processing Parameters [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2006, 42(6): 33-35.
- [10] 邓明进. 高性能反应烧结碳化硅陶瓷材料制备及其性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
DENG Mingjin. Study on Preparation and Properties of High Performance Reaction Bonded SiC Ceramics [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010.
- [11] 武七德, 鄢永高, 赵修建, 等. 纯碳坯渗硅制备反应烧结碳化硅的研究[J]. 武汉理工大学学报, 2003, 25(6): 1-3.
WU Qide, YAN Yongbo, ZHAO Xiujian, et al. Research on the Sintering of Reaction Bonded Silicon Carbide with Pure Carbonaceous Preform [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2003, 25 (6): 1-3.
- [12] 魏明坤, 张广军, 张丽鹏, 等. 渗硅碳化硅材料结构与性能关系的研究[J]. 硅酸盐学报, 2002, 30(2): 254-257.
WEI Mingkun, ZHANG Guangjun, ZHANG Lipeng, et al. Study on the Structure and Properties of Meli-infiltrated Silicon Carbide [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2002, 30(2): 254-257.
- [13] LIM C, ISEKI T. Strength Variations of Reaction-sintered SiC Heterogeneously containing fine-grained/ β -SiC [J]. J. Materials Science, 1988, 23: 3248-3253.
- [14] CHAKRABARTI O P, DAS P K, MUKERJI J. Growth of SiC Particles in Reaction Sintered SiC [J]. Materials Chemistry and Physics, 2001, 67: 199-202.

(编辑 王艳丽)

作者简介: 付曼慧, 女, 1991年生, 硕士研究生。研究方向为激光3D打印。E-mail: 1192461756@qq.com。刘洁(通信作者), 女, 1972年生, 副教授。研究方向为激光3D打印。E-mail: liu_jier@263.com。

(上接第2110页)

- [43] RIEDER H, SPIES M, BAMBERG J, et al. On- and Offline Ultrasonic Characterization of Components Built by SLM Additive Manufacturing [J]// Review of Progress in Qnde, 2016, 1706(1): 156-163.
- [44] RIEDER H, SPIES M, BAMBERG J, et al. On- and Offline Ultrasonic Inspection of Additively Manufactured Components [C]//19th World Conference on Non-Destructive Testing (WCNDT). Munich, 2016: 13-17.
- [45] SCHWERDTFEGER J, SINGER R F, KÖRNER C. In Situ Flaw Detection by IR-imaging during Electron Beam Melting [J]. Rapid Prototyping Journal, 2012, 18(4): 259-263.
- [46] RIDWAN S, MIRELES J, GAYTAN S M, et al. Automatic Layerwise Acquisition of Thermal and Geometric Data of the Electron Beam Melting Process Using Infrared Thermography Proc [C]//Int. Symp. Solid Freeform Fabrication. EI Paso, 2014: 343-352.
- [47] MIRELES J, RIDWAN S, MORTON P A, et al. Analysis and Correction of Defects within Parts Fabricated Using Powder Bed Fusion Technology [J]. Surface Topography - metrology and Properties, 2015, 3(3): 034002.
- [48] ERLER M, STREEK A, SCHULZE C, et al. Novel Machine and Measurement Concept for Micro Machining by Selective Laser Sintering [C]// Proceedings of the International Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, 2014: 4-6.
- [49] JANSON S, BAYERLEIN F, ZÄHM M F. Quality Monitoring of the EBM Process [C]//1st International Conference on Electron Beam Additive Manufacturing. Nuremberg, 2016.
- [50] WONG H, SUTCLIFFE C, FOX P. In-Process EBAM Monitoring with Electronic Imaging [C]//2nd International Conference on Electron Beam Additive Manufacturing. Nuremberg, 2018.
- [51] OSMANLIC F, ARNOLD C, POBEL C, et al. Expanding the Potential of SEBM through Improved Electron Beam Technology [C]//2nd International Conference on Electron Beam Additive Manufacturing. Nuremberg, 2018.

(编辑 王艳丽)

作者简介: 赵德陈, 男, 1991年生, 博士研究生。研究方向为增材制造, 电子束选区熔化在线监测。E-mail: dechen.zhao@foxmail.com。林峰(通信作者), 男, 1966年生, 教授、博士研究生导师。研究方向为增材制造、生物制造、重型液压机。发表论文100余篇。E-mail: lin-feng@tsinghua.edu.cn。