

# 激光增材制造金属构件的 缺陷控制研究进展

曹亮<sup>1</sup>, 姚磊<sup>1</sup>, 梁静静<sup>2</sup>, 商连奇<sup>1</sup>

(1. 辽宁石油化工大学机械工程学院, 辽宁抚顺 113001;  
2. 中国科学院金属研究所师昌绪先进材料创新中心, 辽宁沈阳 110016)

**摘要:** 介绍了激光增材制造原理、技术特点及其适用的金属材料体系, 归纳了常见冶金缺陷的形成机制、影响因素, 并从工艺参数优化和后处理两方面阐述了增材制造冶金缺陷处理的相关研究进展, 明确了工艺参数优化与后处理优化的方向。最后对激光增材制造未来的发展趋势和研究方向作出了展望。

**关键词:** 激光增材制造; 金属构件; 冶金缺陷; 工艺参数; 后处理

增材制造是一种全新的直接成形制造技术, 综合应用了粉末冶金、计算机辅助设计与制造等先进技术, 与传统铸造、锻造等工艺相比, 在成形原理、原料形态、制件性能等方面发生了根本性转变, 被认为是制造技术的一次革命性突破。近年来, 国内外研究人员通过增材制造技术制备出多种金属材料零部件, 如航空发动机内部的涡轮盘、高温合金叶片、燃油喷嘴等。以增材制造为代表的创新技术的开发与应用已成为国家“再工业化”和提升制造业国际竞争力的重要战略举措之一。在国家相关重点战略规划和重大项目的牵引与保障下, 目前增材制造技术已经成功应用在航空航天、军事、医疗等尖端科技领域<sup>[1]</sup>。虽然激光增材制造技术在金属构件制备领域具有巨大的技术优势及广阔的发展前景, 但目前应用于金属材料制备中存在冶金缺陷这一关键瓶颈问题尚未得到彻底解决, 在反复的熔化凝固过程中极易出现裂纹、孔隙、热变形、球化以及残余应力等内部缺陷, 对成形件的力学性能、表面粗糙度、尺寸精度和耐腐蚀性能等造成影响, 严重限制了增材制造的应用。鉴于此, 文中综合国内外相关参考文献及研究报道, 在概述了应用于激光增材制造的典型金属材料基础上, 介绍了激光增材制造的工艺原理和技术特点, 总结了各类冶金缺陷的形成机制、影响因素和控制策略, 并从工艺参数优化和后处理方面综述了冶金缺陷处理的相关研究进展, 最后, 对激光增材制造在金属构件制备领域的重点发展方向进行展望, 以为激光增材制造金属构件的设计与研发提供思路和参考。

## 1 激光增材制造概况

增材制造 (Additive Manufacturing, AM), 又称3D打印, 是一种基于扫描物体或使用计算机软件生成零件的三维模型, 通过特定打印技术将离散材料 (粉末、液体、丝材等) 以逐层熔凝堆积的方法加工成形的低损耗叠层加工技术<sup>[2-3]</sup>。增材制造技术具有材料总体利用率高、效率高、工序少、设计自由度高以及能制造出复杂结构零件等优势<sup>[4]</sup>。与传统的制造过程相比, 增材制造省去了生产步骤, 允许从3D模型设计中快速创建物理对象的原型, 目前增材制造工艺已广泛应用于许多工业部门的复杂形状部件制造中。激光增材制造是增材制造技术中的一类, 以高能量密度的激光束为热源, 在计算机辅助设计 (CAD) 系统的直接输入下将固体粉末逐点熔

作者简介:

曹亮 (1981-), 女, 讲师, 博士, 研究方向为金属材料、增材制造、材料加工。

E-mail: 45815558@qq.com

中图分类号: TF124

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977 (2024)

04-0463-06

收稿日期:

2022-08-19 收到初稿,

2023-12-25 收到修订稿。

化凝固，而后按照预设的路径进行逐点、逐线、逐层的累积，最终构建出三维实体零件<sup>[5]</sup>。选区激光熔化（SLM）是一种基于粉末床的增材制造技术，是目前应用最广泛的增材制造技术之一，其基本原理是利用高能量激光束将金属粉末快速熔化并冷却凝固成形。激光束在短时间内将热量输入到金属粉末中，金属粉末迅速升温达到熔点并快速熔化，激光束离开该点后，熔化的金属粉末经过散热后冷却凝固，实现与固体金属的冶金结合<sup>[6]</sup>。与SLM相似的另一种增材制造技术称为选区激光烧结（SLS），两者最大区别是SLM属于熔化过程，而SLS属于烧结过程。SLS只能用于烧结一些低熔点的非金属材料，其耗材通常由金属材料与低熔点材料混合而成，烧结时部分低熔点非金属材料被激光熔化后作为黏剂熔覆在金属材料表面，采用这种工艺成形的零件往往力学性能和表面光洁度较

差，且内部易出现孔隙。

激光熔化沉积（LMD）是20世纪末新兴的一项快速成形技术，由于同时具有自由成形和快速凝固的特点，使得激光熔化沉积技术能够实现高性能复杂结构零件的无模具快速近净成形<sup>[7]</sup>。不同于SLM的粉末输送方式，LMD的送粉装置与激光器位于同一轴线上，即同步送粉方式，在保护气体推动下将粉末不断送入激光束中形成熔池，随着光斑的移动逐层沉积最终得到成形零件。这种成形工艺破除了SLM上对于零件尺寸的限制，可成形大尺寸的金属零件<sup>[8]</sup>，同时激光熔化沉积技术具备较高的材料利用率，成形件只需进行少量机加工处理，对于梯度类型的金属材料零件可实现直接成形制造。但激光熔化沉积技术使用材料为粒度较大的合金粉末，因此成形件的表面光洁度相较于SLM技术略差。SLS、SLM和LMD示意图如图1<sup>[9-11]</sup>所示。

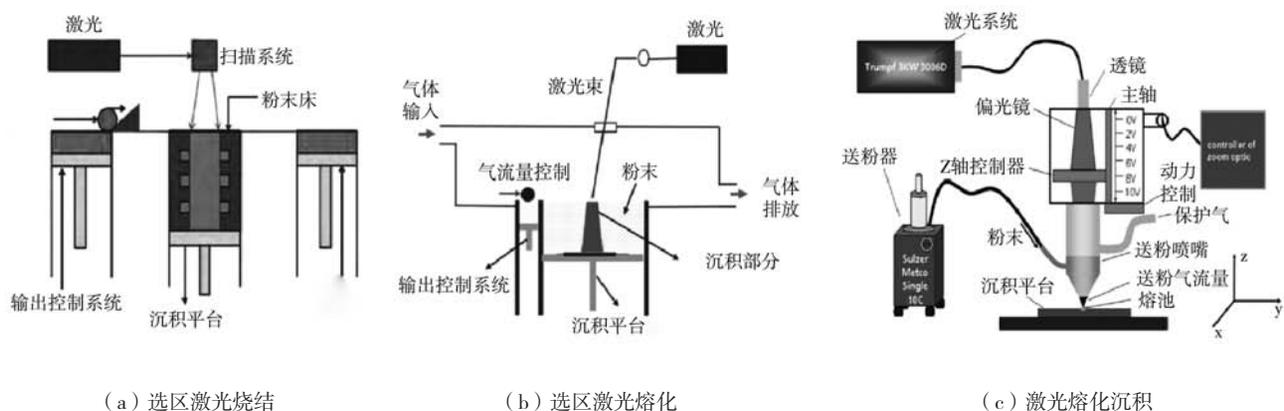


图1 选区激光烧结、选区激光熔化和激光熔化沉积示意图

Fig. 1 Schematic diagram of selective laser sintering (SLS), selective laser melting (SLM), laser melting deposition (LMD)

## 2 激光增材制造金属材料体系

材料与增材制造技术之间具备一种相辅相成关系，材料是增材制造的基础，材料的开发对其发展具有重大影响，增材制造也为提升材料的综合性能提供了广阔的空间。经增材制造获得的材料成分无明显偏析现象，且致密度高，无传统铸造工艺中出现的宏观组织缺陷，一定程度上还可提高材料的强度、塑性及韧性。现阶段研究热点主要集中于高温合金材料和轻量级材料研究，在增材制造过程中针对不同零件所处使用环境及实际使用要求，合理调整材料结构组分，以实现性能与成本的最佳搭配。

镍基高温合金以其优异的高温强度（可在650℃以上的条件下长时间稳定工作）、良好的抗氧化和抗腐蚀性、优异的蠕变与疲劳抗力，以及高温下良好的组织稳定性和使用可靠性而被广泛应用于发动机、燃气轮机、涡轮盘等航空航天领域。镍基高温合金的发

展经历了镍基变形高温合金、铸造镍基高温合金、定向凝固镍基高温合金、镍基单晶高温合金四个阶段，其承温能力不断提高<sup>[12]</sup>。其中以Re等为代表的大量稀有元素的添加是镍基高温合金具有较高承温能力的主要原因。Re是镍基单晶高温合金中的强化元素，用以提高合金的承温能力，能够大幅度提高合金的高温蠕变性能。但包括Re在内的大量难熔元素的添加易使镍基单晶高温合金在长期热暴露过程中析出TCP（拓扑密排）相，导致合金体系不稳定。大量片状TCP相的析出通常不利于合金的蠕变性能，因此，抑制TCP相的析出在合金设计中应着重考虑<sup>[13]</sup>。

钛合金以其优异的耐蚀性、耐热性、高比强度及良好的生物相容性等优异综合性能而被广泛应用于航空航天、生物医学等领域。然而，钛合金属于典型的难加工材料，利用传统工艺成形钛合金材料周期较长，且工艺极其复杂，难以实现批量生产和快速设计

等要求。增材制造赋予了钛合金材料一种全新的设计思路,实现了钛合金材料的构型升级和批量化快速成形<sup>[14]</sup>。

铝基合金以其优异的耐腐蚀性、高比强度、易成形、低密度及良好的力学性能等优点,在工业中得到了广泛应用<sup>[15]</sup>。近年来对铝合金的研发主要集中在开发轻量级、高强度、高韧性的材料,用来满足航空航天等行业的要求。相较于对镍合金、钛合金的激光增材制造研究,对铝合金激光增材制造的研究相对较少。主要原因是与钛合金、镍合金及不锈钢等材料相比,铝合金对激光具有很强的反射率<sup>[16]</sup>,使得对激光的利用率较低,加工时需使用高能量激光器,用来提供高能量激光将金属粉末直接熔化。

### 3 激光增材制造冶金缺陷

现有金属材料主要是针对粉末冶金及铸造工艺开发,一些冶金缺陷在加工过程中难免出现。而利用增材制造制备金属构件时,由于熔池的快速移动,材料与激光束之间相互作用的时间极短,材料处于频繁的急冷急热交替状态,导致熔池部分加热熔化及冷却凝固的速度相较于周围区域更快,在此过程中极易出现裂纹、孔隙、球化以及残余应力等缺陷,严重限制了激光增材制造的应用。为进一步推广激光增材制造在金属材料,特别是在高温合金领域的发展,深入研究材料内部的冶金缺陷形成机制,探索冶金缺陷的减少、消除方法尤为重要。

#### 3.1 裂纹形成机制

##### 3.1.1 凝固裂纹

凝固裂纹也被称为“热裂纹”,出现在糊状区(熔池)内,主要由凝固后期产生的缩孔及枝晶间的高熔点碳化物导致,其形成机制为:在凝固的最后阶段,凝固的液相将沿着固液边界呈连续薄膜状分布,而枝晶在凝固过程中会对熔体的填充产生一种阻碍作用,导致枝晶间没有足够的金属液来填充凝固作用导致的缩孔;同时在凝固过程中还会析出一定量的高熔点碳化物,不利于补充由于凝固作用而产生的缩孔,加剧开裂。两种情况共同作用,使凝固过程产生局部残余应力集中,最终导致枝晶间液膜被撕裂,产生凝固裂纹。凝固裂纹断面具有典型的胞状、树突结构,且通常会在两个表面之间留下形状不规则的较大间隙。

##### 3.1.2 液化裂纹

液化裂纹通常出现在糊状区(熔池)下方的热影响区,主要由热影响区晶界上局部液膜的形成以及拉

应力造成。其形成机理为:激光增材制造过程中的反复冷热循环效应使得热影响区中枝晶间或晶界处的一些 $\gamma/\gamma'$ 共晶低熔点相因二次加热而熔化,该部分不能承受残余应力施加的应变,导致液膜被撕裂产生裂纹。由于液膜主要由枝晶间共晶低熔点相形成,因此液化裂纹通常以沿晶界的形式出现。

##### 3.1.3 应变时效裂纹

应变时效裂纹也被称作固态裂纹,不具备暴露的液膜或枝晶,是一种完全处于固态中的开裂。其形成原因为:增材制造过程中的循环加热对已凝固部分的微观结构产生了一种固有热处理效应,促进了高温合金中 $\gamma'$ 相的形成与长大,使得局部应力应变集中,最终在固相中直接产生裂纹,或在原有裂纹基础上进一步扩展<sup>[17]</sup>。

#### 3.2 孔隙形成机制

孔隙是增材制造中另一种常见的冶金缺陷,在增材制造构件中普遍存在,对成形件致密度及其力学性能有着严重影响,一定程度上制约了增材制造技术的发展。国内外科研人员对激光增材制造构件的孔隙率进行了大量研究,目前普遍认为与未熔融粉末及气体卷入(气孔)有关<sup>[18-19]</sup>。气孔是由于能量的输入密度过大,产生深锁孔熔池,而增材制造过程中熔化和冷却的速度极快,导致熔池内残留气体来不及排除,而被滞留在零件内形成气孔。未熔融粉末主要由激光能量输入不足导致,当能量较低时,会导致穿透材料的激光强度降低,从而无法完全熔化材料,最终形成沿着扫描方向的未熔融孔隙。孔隙的影响因素众多,主要受加工工艺参数的影响,除此之外,在构件内产生的裂纹、球化以及热应力等冶金缺陷都会对孔隙的形成造成一定影响。目前针对孔隙的减少或消除,有研究认为除选取适当工艺参数可有效减少孔隙缺陷外,利用热等静压(HIP)技术对构件进行加压处理,可使残留在构件内部的微量气体溢出,从而降低构件的孔隙率<sup>[20]</sup>。

#### 3.3 变形行为形成机制

变形行为一直是国内外学术界的研究热点,主要由零件内部残余应力引起。由于激光增材制造是一类骤冷骤热、循环往复的过程,各部分的冷却速度不同导致收缩量不一致,但彼此相连相互制约,从而使构件内部产生巨大的残余应力,一旦残余应力超过构件自身的屈服极限,极易发生变形。零件的翘曲变形是加工过程中最为常见的一类变形,这类变形严重影响了零件的加工精度和完整性。国内外针对增材制造金

属零部件的加工变形展开了大量研究,发现成形过程中零件的变形主要为横向的收缩变形和垂直方向的翘曲变形。Kruth<sup>[21]</sup>等结合温度梯度的原理对此类变形现象做出了解释,即在加热过程中熔池受热膨胀,熔池周围的材料受到压应力而背离熔池,在冷却过程中,熔池冷却收缩,受到挤压的材料又受到来自熔池的拉应力,最终形成X向的收缩变形和Z向的翘曲变形。

### 3.4 残余应力形成机制

残余应力是指消除外力或不均匀温度场等作用后,仍以平衡状态残留于材料内部的应力。残余应力主要由加工过程中的塑性变形、温度梯度和固态相变引起,通常由这几种因素综合作用产生。残余应力的存在不仅会降低构件的屈服强度、疲劳强度,而且对构件的成形精度和结构稳定性也会造成影响,在特定情况下构件内部的残余应力还可能会突然释放,导致构件表面产生几何变形或裂纹,从而对构件的使用性能造成不利影响。激光增材制造金属材料残余应力的产生原因可归因于以下两个方面。

(1) 高能量激光束带来的局部热输入引起材料内部的温度分布不均匀,在冷却和凝固过程中与周围环境相互制约而引起局部塑性变形,从而导致了局部热残余应力。

(2) 激光增材制造过程中不同部位的冷却速率不一致,且熔池附近由于快速升温和冷却产生了极高的温度梯度,致使熔池在凝固时相变体积发生变化,进而产生了不均匀塑性变形,最终导致了相变残余应力的产生。

## 4 激光增材制造工艺参数优化

### 4.1 能量密度

激光增材制造是以激光作为能量源将金属粉末熔化并逐层堆积成复杂三维形状的加工工艺。在沉积阶段合理控制能量参数,可有效降低打印过程中产生的冶金缺陷,提高力学性能。激光增材制造能量参数主要包括激光功率、扫描速度、光斑直径、粉层厚度。加工过程中激光能量的大小通常利用能量密度 $E_d$  ( $J/mm^3$ )来表征,其定义为单位体积内激光束提供的能量,如式(1)所示。

$$E_d = \frac{P}{VST} \quad (1)$$

式中: $P$ 为激光功率; $V$ 为扫描速度; $S$ 为扫描间距; $T$ 为铺粉厚度。

其中,对激光能量密度影响较大的参数是激光功率和扫描速度,优化工艺参数时应着重考虑。提高激光能量密度可使粉末材料充分熔化,进而有效减少孔

隙、低致密度等缺陷,但激光能量密度过大时会造成不同层之间温度梯度过高,冷却时产生较大的残余应力,增大了裂纹形成倾向;同时,过高的能量易使材料沸腾,致使部分金属液蒸发,蒸发的气体若残留在熔池内得不到有效释放,则会形成球形孔隙残留在成形件内。只有通过调整上述能量参数,将能量密度大小控制在合理范围内,方能实现对冶金缺陷和微观组织形态的有效调控。

### 4.2 预热温度

在打印起始阶段对基板施加一定温度的预热,可有效降低金属粉末在加热熔化和冷却凝固过程中的温度梯度,减少热应力过大带来的残余应力和各种缺陷的产生。在不同预热温度下,对残余应力和冶金缺陷的影响程度也不同。而大多数材料的屈服极限会随着温度的升高而不断降低,通过对基板进行预热处理,除降低温度梯度外,还可降低材料的屈服极限,当屈服极限低于内部残余应力时,构件将发生一定程度的塑性变形,从而消除掉一部分残余应力。

## 5 激光增材制造后处理工艺

由于熔化堆积过程中扫描速度快、熔池温度高,同时基板预热温度有限,导致冷却时温度梯度大、冷却速率大。过大的冷却速率易导致材料内部产生非平衡态组织,同时在成形过程中易造成热应力堆积。采用合适的热处理工艺能够使组织均匀化,降低增材制造金属构件内部残余应力,改善合金的高温蠕变性能和持久性能。金属材料的热处理方法通常包括固溶处理和时效处理,不同的热处理温度及保温时间会对材料的微观组织造成不同程度的影响,如再结晶体积分数、析出相数量及晶粒尺寸等,因此选取合适的热处理工艺有利于改善合金的微观组织及力学性能。固溶处理是指将合金加热到高温单相区后,使碳化物、 $\gamma'$ 相等过剩相充分溶解到固溶体中,进而使得固溶体产生畸变,增大运动位错阻力,使合金得到强化。时效处理是指合金工件经固溶处理、冷塑性变形或铸造、锻造后,在较高的温度或在室温下放置,其性能、形状、尺寸随时间而变化的热处理工艺。时效处理的目的是将合金在均匀化热处理时固溶在基体内的过饱和的溶质原子以沉淀相的形式析出,并以沉淀第二相的形式实现强化合金性能的效果。单一地使用时效处理往往对合金的力学性能及组织的改善不明显,目前使用较为广泛的是固溶+时效处理方法。进行固溶+时效后,试样的显微硬度、抗拉强度和屈服强度显著提高,组织的变化使得成形件的综合性能得到了充分改

善,满足了复杂结构合金构件的使用标准。

## 6 总结与展望

激光由于其能量密度高、定位精准和快速成形等优点,在增材制造领域应用广泛并开拓了一系列先进金属材料冶金处理工艺和技术。随着我国制造业的崛起和发展,打造无缺陷的激光增材制造产品的市场需求正在快速增长,反过来又强有力地促进激光增材制造领域的研究与技术开发。随着材料适用范围增大和对金属产品组织、性能要求的提高,激光增材制造技术将给金属制造领域带来革命性的发展。但目前利用增材制造技术实现金属材料的工程化应用时,仍然面临着诸如裂纹、孔隙等各类宏观缺陷无法彻底消除的

瓶颈问题。总的来说,调控工艺参数和采取后续热处理是应用于增材制造冶金缺陷控制的两类基本方法。目前国内外针对增材制造工艺参数的试验研究还存在一定的局限性,较多研究人员倾向于将工艺参数的调控与制件性能的关系进行定量分析,缺乏对构件成形机理的研究,同时针对各类工艺参数之间相互影响关系的研究相对较少。要利用增材制造技术实现构件高质量成形,需加强对缺陷形成机理的研究,探索缺陷产生的根本原因及其演变规律,将试验结果与成形原理相结合,实现对增材制造相关工艺参数的进一步优化,从而减少或消除相应缺陷;同时,在增材制造后处理的过程中,对各类缺陷也应当针对性地采取不同的热处理技术。

### 参考文献:

- [1] 常坤,梁恩泉,张韧,等.金属材料增材制造及其在民用航空领域的应用研究现状[J].材料导报,2021,35(3):3176-3182.
- [2] 卢秉恒,李涤尘.增材制造(3D打印)技术发展[J].机械制造与自动化,2013,42(4):1-4.
- [3] LEWIS Gladius. Aspects of the powder in metal additive manufacturing: a review [J]. World Journal of Engineering and Technology, 2022, 10(2): 353-360.
- [4] CHEN Lian, HE Yong, YANG Yingxin, et al. The research status and development trend of additive manufacturing technology [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 89(9): 3651-3660.
- [5] 孙晓峰,宋巍,梁静静,等.激光增材制造高温合金材料与工艺研究进展[J].金属学报,2021,57(11):1471-1483.
- [6] RAMIREZ D A, MURR L E, Martinez E, et al. Novel precipitate microstructural architecture developed in the fabrication of solid copper components by additive manufacturing using electron beam melting [J]. Acta Materialia, 2011, 59(10): 4088.
- [7] 时国浩.激光熔化沉积工艺参数对Ti6Al4V合金组织与性能影响的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021.
- [8] 许德,高华兵,董涛,等.增材制造用金属粉末研究进展[J].中国有色金属学报,2021,31(2):245-257.
- [9] 蒲以松,王宝奇,张连贵.金属3D打印技术的研究[J].表面技术,2018,47(3):78-84.
- [10] 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):15-31.
- [11] CHEN Hong, Dong dongxu, DONG Huadai, et al. Laser metal deposition of TiC/Inconel 718 composites with tailored interfacial microstructures [J]. Optics and Laser Technology, 2013, 54.
- [12] 孙晓峰,金涛,周亦青,等.镍基单晶高温合金研究进展[J].中国材料进展,2012,31(12):1-11.
- [13] 金涛,周亦青,王新广,等.先进镍基单晶高温合金组织稳定性及力学行为的研究进展[J].金属学报,2015,51(10):1153-1162.
- [14] 常坤,梁恩泉,张韧,等.金属材料增材制造及其在民用航空领域的应用研究现状[J].材料导报,2021,35(3):3176-3182.
- [15] CAO F, JIA Y, PRASHANTH KG, et al. Evolution of microstructure and mechanical properties of as-cast Al50Si alloy due to heat treatment and P modifier content [J]. Materials & Design, 2015, 74: 150-156.
- [16] NESMA TA, NICOLA M, et al. Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting [J]. Additive Manufacturing, 2014: 1-4.
- [17] MARTIN John H, YAHATA Brennan D, HUNDLEY Jacob M, et al. 3D printing of high strength aluminum alloys [J]. Nature, 2017, 549: 365.
- [18] AHSAN M N, PINKERTON A J, MOATR J, et al. A comparative study of laser direct metal deposition characteristics using gas and plasma atomized Ti6Al4V powders [J]. Materials Science & Engineering A, 2011, 528(25-26): 7648-7657.
- [19] MOUSSAOUI K, RUBIO W, MOUSSEIGNE M, et al. Effects of Selective Laser Melting additive manufacturing parameters of Inconel 718 on porosity, microstructure, and mechanical properties [J]. Materials Science & Engineering A, 2018, 735: 182.
- [20] TILLMANN W, SCHAAK C, NELLESENJ, et al. Hotisostatic pressing of IN718 components manufactured by selective laser melting [J].

Additive Manufacturing, 2017, 13: 93–102.

- [21] KRUTH J P, DECKERS J, YASA E, et al. Assessing and comparing influencing factors of residual stresses in selective laser melting using a novel analysis method [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2012, 226 ( 6 ) : 980–991.

---

## Research Progress on Forming Mechanism and Control Strategies of Metallurgical Defects by Laser Additive Manufacturing Metal Components

CAO Liang<sup>1</sup>, YAO Lei<sup>1</sup>, LIANG Jing-jing<sup>2</sup>, SHANG Lian-qi<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Liaoning Petrochemical University, Fushun 113001, Liaoning Province, China; 2. Shi Changxu Innovation Center for Advanced Materials, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, Liaoning, China)

### Abstract:

This paper introduces the principle, technical characteristics, and applicable metal material system of laser additive manufacturing. The forming mechanism and influencing factors of common metallurgical defects were summarized, and corresponding control strategies were proposed according to the forming mechanism. The related research progress of the metallurgical defects treatment in the additive manufacturing was described from process parameters optimization and posttreatment. The direction of process parameters optimization and postprocessing optimization was clarified. The future development trend and research direction of laser additive manufacturing were prospected.

### Key words:

laser additive manufacturing; metal component; metallurgical defects; process parameters; post processing

---