

# 3D打印金属材料的微观组织与力学性能关系探讨

丁西安

江苏威拉里新材料股份有限公司 江苏 徐州 221000

**摘要:** 3D打印金属材料的微观组织与力学性能紧密相关。本文介绍了3D打印金属材料的典型工艺、微观组织特征及核心力学性能指标,分析了晶粒特征、相结构、微观缺陷与力学性能的关系,阐述了工艺参数、材料成分、后处理工艺对微观组织形成的影响,并提出了基于工艺、材料设计和后处理的调控策略,以优化材料力学性能,为3D打印金属材料应用提供参考。

**关键词:** 3D打印金属材料; 微观组织; 力学性能; 工艺参数; 调控策略

**引言:** 3D打印金属材料技术发展迅速,在众多领域展现出巨大应用潜力。其独特工艺使材料微观组织有别于传统制造。微观组织作为材料内部结构的基础,对力学性能起着决定性作用。深入探讨二者关系,有助于理解3D打印金属材料性能特点,为优化工艺、设计材料以及提升构件性能提供理论依据,推动该技术在更广泛领域实现高质量应用。

## 1 3D打印金属材料的基础认知

### 1.1 3D打印金属材料的典型工艺类型

粉末床熔融、定向能量沉积和粘结剂喷射是三种典型的金属增材制造工艺,它们分别通过在粉末床上选择性熔化、同步送料熔化和粘结后烧结的方式逐层构建金属零件。粉末床熔融工艺以金属粉末床为基础,激光选区熔化通过聚焦激光束逐点熔化粉末层,层层叠加形成零件形状<sup>[1]</sup>。电子束熔融利用高能电子束轰击粉末,依靠高能量密度实现粉末快速熔化与凝固。两种工艺均需在惰性气体或真空环境中进行,减少金属氧化。定向能量沉积工艺中,激光熔覆通过激光熔化同步输送的金属粉末或丝材,在基材表面形成熔覆层并逐步堆积成形。电弧增材借助电弧作为热源熔化金属丝材,通过机械臂控制运动轨迹完成零件制造,适合大型复杂构件成形。粘结剂喷射工艺先将粘结剂按零件截面形状喷射到金属粉末层表面,使粉末颗粒粘结成形得到生坯。生坯经脱脂去粘结剂后,高温烧结致密化获有强度的金属零件,烧结需控升温速率与保温时间保质量。

### 1.2 3D打印金属材料的微观组织基本特征

增材制造件的微观组织与缺陷特征由其快速凝固特性主导,具体表现为冷却速率决定的晶粒形态与尺寸、合金元素形成的相组成与分布,以及工艺过程中产生的孔隙、微裂纹、高密度位错和夹杂等缺陷,这些共同决定了材料的最终性能。晶粒形态与尺寸受工艺冷却速率影响,快速

冷却易形成沿热传导方向生长的细长柱状晶。冷却较慢或经后处理则生成近似等轴的多边形等轴晶,工艺参数改变晶粒生长环境,快速凝固通常形成更细小的晶粒。相组成与分布中,基体相为主要组成相,决定材料基本性能。析出相由合金元素在凝固或热处理时析出,呈弥散分布或沿晶界聚集。共晶相多出现于特定合金,以固定比例共析,呈层状或棒状结构。微观缺陷特征显著,孔隙因粉末未全熔或气体未排出形成,尺寸微小且分布不均。微裂纹多因冷却过快致内应力过大产生,沿晶界或相界扩展。快速凝固易产生高密度位错,夹杂来源于原料杂质或成形异物,影响材料纯净度。

### 1.3 3D打印金属材料的核心力学性能指标

材料的力学性能主要包括强度(抗拉、屈服、疲劳强度)、塑性(伸长率、断面收缩率)、韧性(冲击韧性)以及硬度与耐磨性,它们共同表征材料在不同载荷作用下抵抗变形与破坏的能力。强度性能中,抗拉强度指材料受拉至断裂前能承受的最大应力,反映抵抗拉伸破坏的极限能力。屈服强度为材料开始塑性变形时的应力,标志从弹性阶段进入塑性阶段。疲劳强度代表循环载荷下经无数次循环仍不断裂的最大应力,直接关联抗疲劳破坏能力。塑性与韧性体现变形与抗冲击能力,伸长率是断裂后标距段伸长量与原长的比值,断面收缩率为断口横截面积缩减量与原面积的比值,二者均反映塑性水平。冲击韧性衡量冲击载荷下的能量吸收能力,吸能越多韧性越好。硬度与耐磨性关联紧密,维氏硬度通过金刚石正四棱锥压头压痕对角线长度计算。洛氏硬度采用不同压头与载荷测定,适配不同硬度范围。硬度越高,材料表面抗塑性变形能力越强,通常耐磨性也更优。

## 2 3D打印金属材料微观组织与力学性能的核心关系

### 2.1 晶粒特征对力学性能的影响机制

晶粒的尺寸、取向与边界状态共同决定材料的性

能,其中细晶强化能提升强度,择优生长的晶粒取向会导致力学性能各向异性,晶界析出相与杂质的存在则会显著影响材料的强塑性。晶粒尺寸与强度的关联遵循细晶强化逻辑,晶粒越细小,晶界数量越多,晶界如同屏障阻碍位错运动,材料抵抗塑性变形的能力随之增强,强度自然提升。粗晶状态下晶界数量减少,位错易在晶粒内部自由滑移,材料强度显著下降。晶粒取向与力学各向异性紧密相关,3D打印中热量沿特定方向传导,晶粒沿热传导方向择优生长,使打印方向与横向的晶粒取向差异明显,不同方向性能分化,部分材料横向塑性会显著降低。晶粒边界状态直接调控性能,析出相细小弥散分布可增强晶界强度,粗大连续分布则削弱晶界结合力,导致塑性下降。晶界清洁度高时原子结合紧密,同步提升强度与塑性;杂质易形成薄弱区,低熔点杂质还会形成软化层,加剧性能劣化。

## 2.2 相结构与力学性能的内在联系

基体相、析出相与相界面的特性共同调控材料的强韧性。基体相奠定力学性能基础,弥散分布的析出相通过阻碍位错运动提升强度,相界面的结合状态则直接影响应力传递效率和裂纹萌生倾向,进而决定材料的韧性与耐久性。基体相作为材料核心组成,其强度与塑性决定基本力学表现<sup>[2]</sup>。基体相强度高时材料整体强度就有良好基础,塑性优时材料不易发生脆断。析出相通过弥散强化与沉淀强化提升强度,细小均匀分布的析出相可有效阻碍位错运动,显著增强强度;尺寸过大或分布不均时,强化效果减弱,甚至因应力集中降低塑性。二者区别在于沉淀相与基体有化学交互作用,弥散相则无,但均通过阻碍位错实现强化。相界面状态直接影响韧性与稳定性。结合紧密时能有效传递应力,减少集中,提升韧性;结合薄弱则易分离,成为裂纹萌生源。多相合金中,相界面相容性能影响抗腐蚀性,与高温稳定性,形成稳定钝化膜可增强抗腐蚀能力,若发生化学反应生成脆性相,会进一步劣化力学性能。

## 2.3 微观缺陷对力学性能的作用规律

孔隙、微裂纹和位错等微观缺陷共同调控材料的力学性能:孔隙和微裂纹通过减少有效承载面积和引发应力集中而显著降低强度与疲劳寿命;位错密度则通过加工硬化机制提升强度,但需与塑性取得平衡。孔隙缺陷会直接削弱材料承载能力,孔隙尺寸越大、分布越密,内部有效承载面积越小,强度下降越明显。疲劳载荷下,孔隙易成应力集中点,加速疲劳失效,缩短构件寿命。微裂纹会改变材料断裂行为,受力时易萌生扩展,贯穿内部即致脆性断裂,裂纹越多越长,断裂韧性越

低,部分材料甚至失大部分承载能力。位错密度与加工硬化关联密切,密度高时位错易堆积缠绕,阻碍运动使强度提升、塑性下降;调控位错密度与组态,可平衡强度与塑性,如低温轧制增密提强度,或退火减位错改善塑性,适配不同场景需求。

## 3 影响3D打印金属材料微观组织形成的关键因素

### 3.1 工艺参数的调控作用

能量输入参数中,激光或电子束功率直接影响熔池温度与熔化深度,功率过高易导致熔池过大引发晶粒粗化,功率过低则可能造成粉末未完全熔化。扫描速度与熔池凝固速率相关,速度过快使熔池快速冷却,易形成细小晶粒与非平衡组织,速度过慢延长熔池存在时间,促使晶粒充分生长。成形路径参数里,扫描间距决定相邻熔道的搭接质量,间距过大易出现未熔合区域,间距过小则可能因热累积导致局部晶粒粗大。层厚影响层间结合与热传导,层厚过厚会降低层间结合强度,层厚过薄则增加热输入次数,改变晶粒生长方向。气氛环境参数方面,保护气体种类需适配金属材料特性,部分材料适合氩气保护,部分则需氮气环境。气体纯度不足会导致金属氧化,形成氧化物夹杂,改变材料相组成,影响微观组织均匀性。

### 3.2 材料成分的调控效应

基体元素选择是微观组织形成的基础,纯金属打印后组织相对单一,晶粒生长受工艺影响显著,性能调节空间有限;合金基体因含有多种元素,易形成固溶体或化合物,组织构成更复杂,可通过元素配比灵活调整性能,调节空间更大。合金元素添加中,强化元素可通过固溶强化或形成析出相提升材料性能,如钛合金中添加铝元素形成 $\alpha$ 相强化基体;细化晶粒元素能抑制晶粒生长,促使形成细小等轴晶,如镁合金中添加锆元素阻碍晶界迁移。不同元素含量与组合方式,会改变相组成比例与晶粒尺寸,元素含量过高可能形成脆性金属间化合物,反而劣化组织性能。粉末特性影响不容忽视,粉末粒度均匀性差会导致熔化不一致,出现组织缺陷;球形度不佳的粉末流动性差,易造成铺粉不均,影响熔池成形,还可能导致局部密度不足;粉末纯度不足含有的杂质,会在打印过程中形成夹杂,破坏组织连续性,尤其高熔点杂质易残留形成硬脆相,加剧组织不均,降低材料疲劳性能。

### 3.3 后处理工艺的优化作用

热处理工艺中,退火可消除打印内应力,促使晶粒回复与再结晶,细化粗大晶粒,针对马氏体含量较高的金属材料,退火还能降低脆性、改善塑性;正火能调整

组织形态,使组织更均匀,尤其适合改善打印件因热输入不均形成的带状组织;固溶时效通过溶质原子析出,形成弥散强化相,改变微观组织与性能,不同合金需匹配专属时效制度以实现强度与韧性的平衡。热等静压工艺借助高温与高压协同作用,促进材料内部原子扩散,使孔隙闭合,提升组织致密化程度,减少缺陷,对高孔隙率打印件的组织优化效果尤为明显,同时能消除层间结合薄弱问题,增强材料整体一致性<sup>[3]</sup>。表面处理工艺里,喷丸通过机械力作用使表层产生塑性变形,细化表层晶粒,引入残余压应力,有效抑制表面裂纹萌生;抛光可去除表面氧化层与粗糙结构,改善表层组织状态,减少表面缺陷对整体组织的影响,对需高精度配合的构件,还能提升表面光洁度与尺寸精度。

#### 4 3D打印金属材料微观组织的调控策略与力学性能优化

##### 4.1 基于工艺参数的微观组织调控

能量输入匹配需兼顾激光或电子束功率与扫描速度,通过两者协同调节熔池冷却速率。功率与速度的合理配比可控制熔池凝固时间,缩短凝固时间能抑制晶粒长大,形成细小晶粒;延长凝固时间则利于晶粒充分生长,满足特定组织需求。成形路径优化可采用分区扫描方式,将打印区域划分为多个子区域,按预设顺序依次扫描,减少相邻区域热影响叠加。旋转扫描通过调整每一层的扫描方向,打破晶粒单一生长趋势,促使晶粒取向更均匀,削弱性能各向异性。分层工艺调整聚焦层厚与扫描间距的匹配,层厚过大时需减小扫描间距,确保相邻熔道充分搭接;层厚过小时可适当增大扫描间距,避免热输入过度集中,通过两者适配减少未熔合与孔隙缺陷,提升组织致密性,尤其对复杂形状构件,需根据局部结构微调参数以保障整体组织一致性。

##### 4.2 基于材料设计的微观组织调控

合金成分优化需针对性添加元素,根据目标组织与性能选择晶粒细化剂,通过细化剂阻碍晶界迁移,抑制晶粒粗化;添加强化相形成元素,促使材料内部生成细小弥散的强化相,增强材料强度。粉末预处理中,球化处理通过气流雾化等方式改善粉末球形度,提升粉末流

动性与铺粉均匀性,减少打印过程中因粉末堆积不均导致的组织缺陷。包覆改性在粉末表面形成均匀涂层,调节粉末熔化特性,提升成形过程中组织稳定性,避免成分偏析。复合体系构建通过金属基复合材料设计,在金属基体中引入陶瓷颗粒等第二相,第二相颗粒可作为异质形核点细化晶粒,同时发挥强化作用,实现微观组织与力学性能的协同调控,对高温服役构件,还可选择耐高温第二相提升材料耐热性。

##### 4.3 基于后处理的力学性能提升

分级热处理通过多阶段温度与保温时间控制,先采用较低温度消除打印内应力,再升温至再结晶温度促使晶粒细化,最后通过低温保温实现相均匀分布,兼顾材料强度与塑性。缺陷修复工艺结合热等静压与局部补焊,热等静压在高温高压环境下促进原子扩散,闭合内部孔隙;对未熔合等局部缺陷,通过局部补焊填充材料,修复缺陷区域,减少微观缺陷对力学性能的削弱。应力调控技术中,去应力退火通过缓慢升温与降温,释放打印过程中产生的内应力,改善应力分布;表面淬火采用高频感应加热等方式,使材料表层快速加热并冷却,形成淬硬层,同时引入残余压应力,提升材料表面硬度与疲劳性能,延长构件服役寿命,对承受循环载荷的关键部件,该技术能显著降低疲劳失效风险。

##### 结束语

3D打印金属材料微观组织与力学性能关系复杂且紧密。工艺参数、材料成分和后处理工艺等因素对微观组织形成影响显著,通过合理调控这些因素,可优化微观组织,进而提升材料力学性能。未来需进一步深入研究,开发更精准的调控技术,满足不同领域对3D打印金属材料性能的多样化需求,推动该领域持续发展。

##### 参考文献

- [1]柳朝阳,赵具备,李兰杰,等.金属材料3D打印技术研究进展[J].粉末冶金工业,2020(2):7.
- [2]卢成绩,张敏凯,张还,廖志,金江成.3D打印技术在精密机械制造中的应用分析[J].中国机械,2024,(18):32-35.
- [3]王伟.金属3D打印技术在航空航天领域的应用与发展[J].航空制造技术,2022,53(3):45-50.