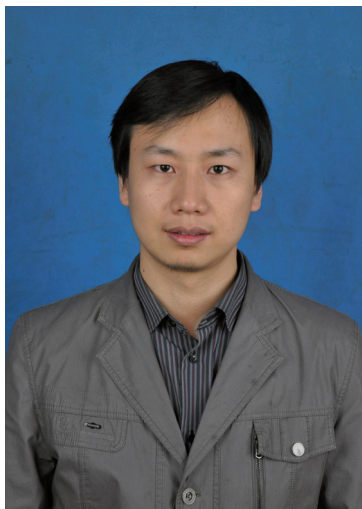


选择性激光熔化成形关键 基础问题的研究进展*

Research Progress of Key Basic Issue in Selective Laser Melting of Metallic Powder

西北工业大学凝固技术国家重点实验室 李瑞迪
华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室 魏青松 刘锦辉 史玉升
中南大学粉末冶金国家重点实验室 袁铁锤



李瑞迪

西北工业大学材料学院博士后,从事激光快速成形与焊接方面的研究,参加多项科研项目,已发表学术论文 20 余篇。

基于快速制造高性能复杂金属零件的需求,选择性激光熔化(Selective Laser Melting, SLM)快速成形技术诞生了,它是快速原型制造

SLM 技术集成了先进的激光技术、计算机辅助设计与制造(CAD/CAM)技术、计算机控制技术、真空技术、粉末冶金技术。SLM 技术的出现给复杂金属零件的制造带来了一场革命。当前,SLM 技术的研究正成为热点并受到国内外学术界和制造界的广泛重视。

(Rapid Prototyping & Manufacturing, RP&M)的最新发展形式之一。SLM 成形技术基于分层-叠加制造的思想,利用高能量激光束将金属粉末逐层熔化并形成金属零件,具有制作形状复杂、相对密度高、节省材料等优点^[1-2]。SLM 成形的基本思想与其他快速成形技术相同:首先建立零件的 CAD 模型,对零件原型逐层切片,每一层切片均包含截面的几何信息,并生成 STL 格式文件。然后在计算机控制下利用高能激光束熔化切片区域内的金属粉末,采用增长制造的原理成形出金属零件。

总之,SLM 技术集成了先进的激光技术、计算机辅助设计与制造(CAD/CAM)技术、计算机控制技术、真空技术、粉末冶金技术。SLM 技

术的出现给复杂金属零件的制造带来了一场革命。当前,SLM 技术的研究正成为热点并受到国内外学术界和制造界的广泛重视。在国外,研究 SLM 的国家主要集中在德国、日本、比利时、法国等。其中德国是研究该技术最早、技术最成熟的国家。德国的 MCP 公司和 EOS 公司、法国的 Phenix 公司推出了商品化的激光熔化成形设备,并在国际上处理领先地位。国内从事 SLM 设备与工艺研究的单位主要有华中科技大学快速成形中心及光电国家实验室、华南理工大学、南京航空航天大学、西北工业大学等。华中科技大学和法国 Phenix 公司采用 SLM 制作的复杂金属零件分别如图 1、图 2 所示。

目前,SLM 技术在国外已经用

* 国家自然科学基金项目(51101126)、中国博士后科学基金(20110491684)、粉末冶金国家重点实验室开放基金(20110942K)资助。

于航空航天、生物医学、军事装备等领域关键零部件的制造,取得了积极进展,成为RP&M技术重要的发展方向。但是,由于SLM伴随复杂的物理化学冶金等过程,成形过程容易

光熔化后如果不能均匀地铺展于前一层,而是形成大量彼此隔离的金属球,这种现象被称为SLM过程的球化现象^[3],如图3所示。球化现象对SLM技术来讲是一种普遍存在的成

之,当 $\theta > 90^\circ$ 时,SLM熔池将凝固成金属球后粘附于前一层上。这时, $-1 < \cos\theta < 0$,可以得出球化时界面张力之间的关系为:

$$\sigma_{V/S} + \sigma_{L/V} > \sigma_{L/S} \quad (2)$$

产生球化的原因主要是吉布斯自由能的能量最低原理。金属熔池凝固过程中,在表面张力的作用下,熔池形成球形以降低其表面能。目前,SLM球化的形成过程、机理与控制方法是技术难点。下面将具体介绍目前国内外在直接激光熔化成形过程球化工艺控制与机理分析方面的研究状况。

白俄罗斯科学院的Nikolay K.学者研究了激光与金属粉末作用时球化形成的具体过程^[4]。该研究将球化过程分别描述为碟状、杯状、球状3种典型的形状,并分析了它们各自形成的机理。但是SLM过程涉及复杂的线、面、体成形,该研究并没有指出SLM在多层成形过程中球化的形成特点、机理与控制方法。

南京航空航天大学的顾冬冬博士研究了铜基合金与不锈钢在CO₂激光器直接成形时的球化行为,分析了球化产生的机理^[5],如图5所示。该研究指出铜基合金激光直接成形时的球化特征可分为以下几种类型:(1)由初始扫描道分裂形成的较为粗大的球体,被称作“第一线球化”,可以通过对粉床的预热来消除;(2)在较高的扫描速度下,熔化道进行纵向和横向的过度体积收缩,进而形成“收缩球化”,可以通过降低扫描速度来抑制球化发生;(3)在较高的线能量密度(高的激光功率和低的扫描速度)下,容易产生过多液相,从而产生“自球化”。

比利时鲁汶大学的J. P. Kruth教授自配了一种铁基复合粉末,分析了其SLM成形过程的球化行为^[1]。该研究首先指出,激光扫描道可以看作是半圆柱体,其长度与宽度的比值越大,熔化道则越具有较大的比表面

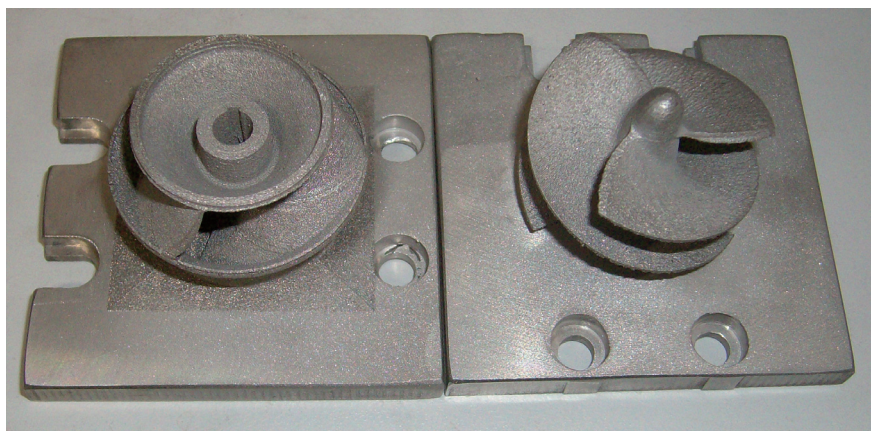


图1 华中科技大学快速制造中心采用SLM制作的复杂金属零件

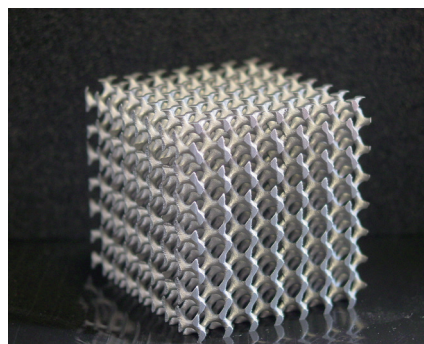
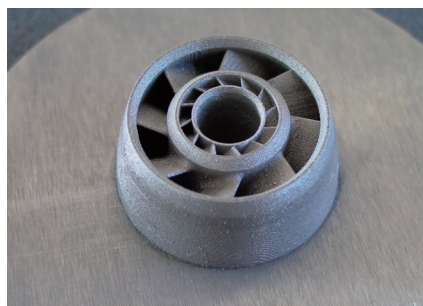


图2 法国Phenix公司采用SLM技术制作的复杂金属零件

产生球化、孔隙、裂纹等缺陷;同时,国内在SLM成形方面还处于起步阶段。本文对SLM技术涉及到的关键理论问题,如球化、孔隙、成形材料等基础理论问题进行了概述性介绍。

球化现象

在SLM过程中,金属粉未经激

形缺陷,严重影响了SLM成形质量。球化的产生会使铺粉辊在铺粉过程中与前一层产生较大的摩擦力,不仅会损坏金属表面质量,严重时还会阻碍铺粉辊使其无法运动,最终导致成形零件失败。

球化现象产生归结为液态金属与固态表面的润湿问题。图4为熔池与基板润湿状况示意图。

三应力接触点达到平衡状态时合力为0^[1],即:

$$\sigma_{V/S} = \sigma_{L/V} \cos\theta + \sigma_{L/S} \quad (1)$$

其中, θ 为气液间表面张力 $\sigma_{L/V}$ 与液固间表面张力 $\sigma_{L/S}$ 的夹角。当 $\theta < 90^\circ$ 时,SLM熔池可以均匀地铺展在前一层上,不形成球化现象;反

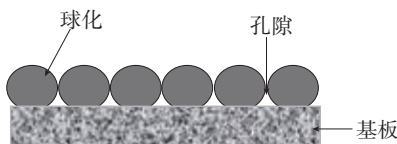


图3 球化形成孔隙示意图

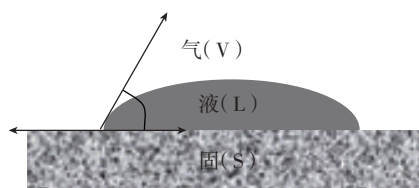


图4 熔池与基板的润湿示意图

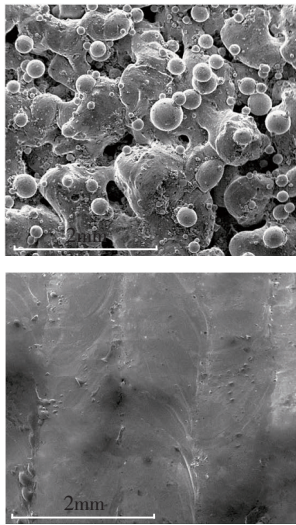


图5 顾冬冬学者揭示的球化与非球化形貌

积,不利于熔化道与金属基体的润湿,从而形成球形;其次,研究了不同功率与速度下的球化特征,并依次建立了加工窗口,结果表明,在较低的扫描速度与激光功率下能够得到较为平坦的表面,而不会产生球化。最后,该研究指出,球化的产生还与表面氧化有关,可以通过采用较高激光能量来打破连续的氧化膜,进而净化固/液界面,也可以采用添加脱氧剂(如磷铁)以降低表面张力。伊朗 A. Simchi 学者分析了纯铁粉激光熔化成形时的表面状况,研究了不同扫描间距对球化的影响^[6]。该学者同样指明球化是由于毛细不稳定性产生的,且伴随着表面能的减少。通过减少扫描间距进行重复熔化,可以减少球化的产生,获得较平坦的成形件表面。英国利兹大学的 T. H. C. Childs 学者研究了 SLM 成形时激光束单道扫描规律,在不同的扫描速度与激光功率下,建立了功率-速度-熔化线特性的加工窗口,从而揭示球化的规律^[7]。

孔隙形成

SLM 技术的另一个重要缺陷是成形过程容易产生孔隙,从而降低金属件的力学性能,严重影响 SLM 成形零件的实用性。SLM 的最终目标

是制造出高致密的金属零件,因此,研究孔隙的形成以及孔隙率的影响因素对于提高成形件性能、提升 SLM 技术的实用性具有非常重要的作用。目前,国内外在 SLM 孔隙率的研究方面主要集中在摸索工艺参数对孔隙率影响的经验规律,以选取合理的成形工艺制造出致密的金属零件。图 6 为华中科技大学快速制造中心采用 SLM 技术制备的致密与孔隙零件的组织结构^[8]。

伊朗 A. Simchi 学者在激光直接成形铁基粉末的孔隙率方面做了较为系统的研究,取得了一系列理论与实际成果^[9]。该学者使用 EOS M250 设备进行成形参数与孔隙率关联性的研究。这种直接激光成形的机制为熔化/凝固机制,不需要对零件进行熔渗后处理,因此,这种成形技术与 SLM 成形本质是相同的,只是概念上的提法不同。由于 SLM 技术是基于线、面、体的成形思路,其致密化行为受到多种加工参数,如扫描速度 v 、激光功率 p 、切片层厚 d 、扫描间距 h 的影响。这些参数可以综合归纳

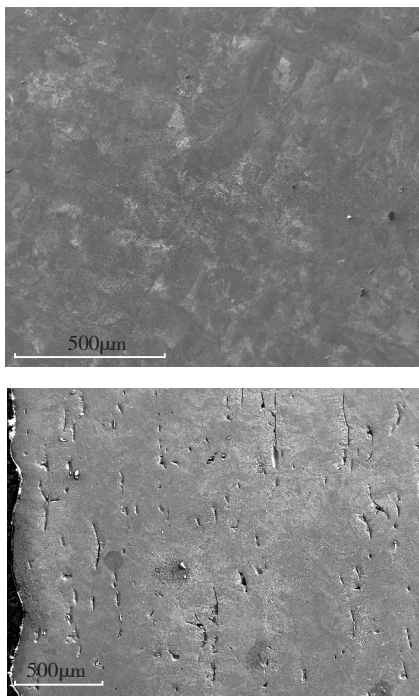


图6 华中科技大学快速制造中心制备的致密与孔隙SLM组织结构

为一个“体能量密度” $\psi = p/(vhd)$ 来表示。该学者指出,随着体能量密度的提高,成形件的相对密度随之增加,但随着体能量密度更进一步提高,成形件相对密度上升趋势缓慢并趋近于某一固定值;最后,该学者通过数据拟合,指出成形件的相对密度与能量密度满足指数关系,并推导出了致密化方程。

德国鲁尔大学 H. Meier 学者利用 MCP Realizer250 SLM 设备对不锈钢成形进行了研究。研究发现,孔隙较少,表面熔化道搭接良好并较为平坦,因此该成形件具有接近 100% 的相对密度与较高的力学性能。该学者研究了不锈钢粉末 SLM 成形的相对密度与加工参数的关系,得出了以下主要结论^[10]:高激光功率有利于成形出高密度的金属零件;高的扫描速度容易造成扫描线的分裂,低的扫描速度有利于扫描线的连续,促进致密化;能量密度的增大有利于成形件相对密度的提高,但继续提高能量密度,相对密度的增幅平缓并趋近于 100%。

南京航空航天大学顾冬冬博士研究了铜基合金的孔隙率与加工参数的关系^[11]。他指出:体能量密度是影响孔隙的关键因素,较高的能量密度有利于致密化,消除孔隙,但过高的体能量密度反而会导致孔隙率的上升;因而要合理控制体能量密度,避免因能量输入不足或能量过高导致孔隙等成形缺陷。

类似于成形参数-孔隙率关联性的研究还有以下文献报道:日本大阪大学的 F. Abe 等学者采用自行研发的 SLM 设备成形对 Ti 粉 SLM 成形相对密度进行了研究,成形出了相对密度为 96% 的纯钛零件,并讨论了激光功率与扫描速度对相对密度的影响^[12];新加坡国立大学的 Y. Tang 学者研究了铜基合金直接激光成形的相对密度与成形参数的关系,最高相对密度达到 82.2%。

目前,利用 SLM 制造金属多孔材料及零件也是另一个发展方向。这是因为金属多孔材料具有独特的物理性能如低比重、高透过性、高热导率、良好的生物相容性,已被广泛用于过滤、热交换、生物医学、液体存储等领域^[13]。因此,研究在 SLM 成形条件下如何控制金属零件的孔隙率、形状、分布对发展 SLM 成形多孔材料具有重要的推进作用,目前已有文献对此报道。图 7 为华中科技大学快速制造中心采用 SLM 技术制造的多孔金属零件^[8]。南京航空航天大学顾冬冬博士进行了多孔不锈钢激光成形的工作,研究了孔隙可控的工艺与形成机理^[14]。英国利物浦大学的 R. Stamp 等人研究了使用 SLM 技术进行空间三维编织,以成形孔隙可控的钛零件,该多孔零件可以应用在生物医学领域^[15]。

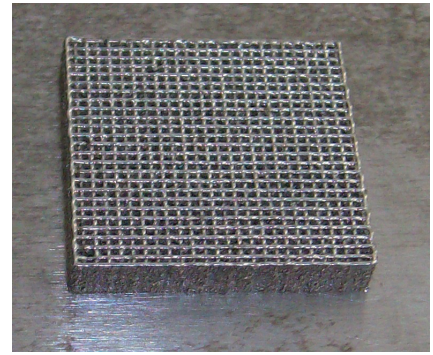
成形材料

SLM 成形技术的最大优点就是能够逐层熔化各种金属粉末生成复杂形状的金属零件。然而,SLM 技

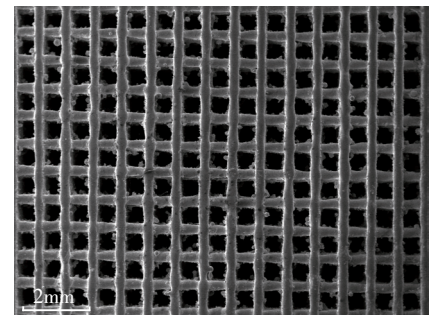
术在熔化金属粉末时,在其相应的热力学与动力学规律作用下,有些粉末的成形易伴随球化、孔隙、裂纹等缺陷。大量文献指出,并非所有的金属粉末都适合于 SLM 成形,因此有必要研究适用于 SLM 成形的金属粉末材料,并分析相应的冶金机理^[18]。目前,研究 SLM 成形材料是一个重要课题,国内外有大量文献对此进行了报道。下文对国内外 SLM 成形材料进行分类并对其最新研究进展进行讨论。

1 铁基合金

表 1 列出了国内外用于 SLM 成形的铁基金属粉末类型及其成形特性。铁基合金是工程技术中最重要、用量最大的金属材料,因此铁基粉末的 SLM 成形是研究最广泛、最深入的一种合金类型。A. Simchi 学者最为系统地研究了铁基粉末的激光直接成形,主要针对以下粉末:纯 Fe 粉^[6]、Fe-C 混合粉^[16]、Fe-C-Cu-P 混合粉^[8,17]、316L 不锈钢合金粉末^[10]、M2 高速钢合金粉末^[18-19]。A. Simchi 的研究结果表明,纯铁粉直接激光熔化



(a) 实物图



(b) SEM 照片

图7 华中科技大学快速制造中心采用 SLM 技术制造的多孔金属零件

时容易伴随大量孔洞产生,而通过合金化可以提升成形动力学、改善形性能、提高相对密度。主要表现在:(1) Cu 粉作为粘结元素,可以降低熔化温

表1 国外用于SLM直接成形的铁基金属粉末

粉末类型	粉末特性	成形效果	成形设备	研究机构
Fe	水雾化;粒径:50 μm ;氧含量:0.0612%	相对密度:78%		
Fe-C	Fe 与 C 球磨混合; $D_{50}=68\mu\text{m}$	相对密度:80.8%	德国 EOS M250X;200W CO ₂ 激光器,配备粉床预热系统	伊朗 Sharif 科技大学, A Simchi ^[6, 9, 16-19, 22]
Fe-0.8C-4Cu-0.4P	球磨混合	相对密度:80.6%		
316L 不锈钢	气雾化预合金; $D_{50}=19\mu\text{m}$	相对密度:93%		
M2 高速钢	气雾化预合金; $D_{50}=21\mu\text{m}$	相对密度:88.2%		
Fe-20Ni-15Cu-15Fe3P	Fe、Cu、Fe3P 粉粒径小于 60 μm , Ni 粉粒径小于 5 μm ;表观密度:3.17g/cm ³ ;以上粉末进行球磨混合	相对密度:91%;抗弯强度:630MPa;表面平坦,基本无球化现象	自主研发设备;激光器:300W Nd-YAG;成形气氛:抽真空,然后通入氮气或氩气	比利时鲁汶大学, J. P. Kruth ^[1]
Fe-29Ni-8.3Cu-1.35P	单质粉末均匀混合;平均粒径:4.3 \pm 2.9 μm	相对密度:97.4%;正、侧面粗糙度分别为 18.2 μm 、12.6 μm ;枝晶硬度:381 \pm 30HV 5 gf	德国 EOS M250;200W CO ₂ 激光器,聚焦光斑 0.4mm	瑞典卡尔斯塔德大学, Y. Wang ^[20]
H13 工具钢	80% 粉末粒径小于 22 μm	相对密度:84%;表面粗糙度:8.2 μm	90W Nd:YAG 激光器	英国利物浦大学, J.W. Xie ^[21]
316L 不锈钢	气雾化球形粉;平均粒径:22 μm	相对密度:99%;拉伸强度:约 750MPa	德国 MCP Relizer 250;100W 光纤激光,激光损耗率低于 10%;成形气氛:氩气 40mbar	德国鲁尔大学, H. Meier ^[10]

度,添加 Cu 粉有利于提高反应活性;
(2) 添加石墨粉有利于降低熔化温度、减小表面张力与液体粘度、减少 Fe 的氧化。另外,该学者还指出,通过工艺参数优化,SLM 成形件力学性

状的金属零件,因此 SLM 技术被成功应用于成形镍基合金材质的发动机涡轮零件。国内外 SLM 所用镍基合金粉末如表 2 所示。

镍基合金 SLM 成形的研究主

表2 国内外用于SLM直接成形的镍基金属粉末

粉末类型	粉末特性	成形效果	成形设备	研究机构
Waspaloy [®]	时效硬化镍基高温合金; 平均粒径:63μm	相对密度:99.7%	550W Nd:YAG 激光器; 四轴数控工作台;氩气 流速:15ml/s	英国拉夫堡大学,快速制造研究中心, K. A. Mumtaz ^[23,24]
Inconel 625	粒径:53 ± 25μm	上表面粗糙度:4~9μm; 侧面粗糙度:10~20μm		
	90% 的粉末粒径小于 20μm	相对密度:95%;最大抗拉强度:1070 ± 60MPa; 最大屈服强度:800 ± 20MPa;延伸率:8%~10%	法国 Phenix PM100; 50WIPG 光纤,光斑直径 70μm	法国圣太田国立工程师学院, I. Yadroitsev ^[25]
Ni-Ti 形状记忆合金	Ni:Ti=1:1	无球化与翘曲产生;可用来人工植入	自主研发 DiMetal-240 型;100W Nd-YAG	华南理工大学,杨永强教授 ^[26]
	球形粉;粒径:20~100μm	相对密度:98%	德国 MCP Realizer; IPG 光纤激光	英国利物浦大学, P. Chalker ^[27]

能与相对密度可以达到传统粉末冶金水平^[16-17]。

比利时鲁汶大学的 J. P. Kruth 通过球磨法制备了 Fe-20Ni-15Cu-15Fe3P 混合粉末以用于 SLM 成形^[1]。其中加入磷铁的目的是为了减少合金元素的氧化,提高熔池的润湿性能。试验结果表明这种合金粉末取得了良好的成形效果:成形表面为平坦鱼鳞状特征,未出现球化现象,成形件相对密度达到 91%,弯曲强度超过 900MPa。

类似地, Y. Wang 学者制备了 Fe-29Ni-8.3Cu-1.35P 混合粉末,也取得了良好的成形效果:相对密度达到 97.4%,正表面粗糙度为 18.2 μm^[20]。另外,其他用于 SLM 成形的粉末还有工具钢粉末^[26]与 316L 不锈钢粉末^[21-22]。

2 镍基合金

镍基合金具有良好的综合性能,如好的抗氧化和抗腐蚀性能,良好的力学性能,因此被广泛用于航空、航天、船舶、石油化工等领域。例如,镍基高温合金可以用在航空发动机的涡轮叶片与涡轮盘方面。由于 SLM 技术的主要优势体现在成形复杂形

要集中在镍基高温预合金粉末的成形。英国拉夫堡大学的 K. A. Mumtaz 学者研究了 Waspaloy[®] 合金^[23]与 Inconel625 合金^[24]的 SLM 成形。该合金是一种时效硬化超强合金,具有优异的高温强度与抗氧化性、耐腐蚀性能,被用于航空航天发动机的涡轮零件,通过 SLM 成形,相对密度高达 99.7%。法国圣太田国立工程师学院 I. Yadroitsev 学者研究了 Inconel 625 合金的成形,得到了带有内螺旋管道的零件^[25]。在新型镍基合金材料成形方面,华南理工大学杨永强教授与英国利物浦大学的 P. Chalker 研究了 SLM 成形 NiTi 形状记忆合金^[26-27],取得了较好的成果,为 Ni 基合金在更新的领域应用开辟了研究方向。

3 钛基合金

钛合金具有优良的抗腐蚀性能以及良好的生物相容性,因此钛合金零件可以用于航空航天、生物医学等领域。钛的熔点为 1720℃,低于 882℃时晶体结构为密排六方,高于 882℃时晶体结构为体心立方。通过添加合金元素,可使相结构与相变温度发生改变,钛合金存在 3 种基体组织,也就是 α, (α+β) 和 β。例如,

铝是稳定 α 元素,钼、铌和钒是稳定 β 元素。目前,钛合金 SLM 成形主要集中在纯钛粉、Ti-6Al-7Nb 与 Ti-6Al-4V 合金粉末方面,都是应用在生物骨骼及其医学替代器件方面。

该合金粉末的研究进展情况如表 3 所示。

4 铜基合金

国内外对铜合金粉末的 SLM 成形进行了研究,其主要进展如表 4 所示。铜合金具有良好的导热、导电性能,又具有较好的耐磨与减磨性能,广泛应用于电子、机械、航空航天等领域。由于铜粉比较容易氧化,SLM 成形时容易产生球化等缺陷,故铜基合金材料成分设计尤为重要。一般来讲, CuSn 由于熔点较低,主要用作粘结剂;而 CuP 可以作为脱氧剂,以减少成形的球化^[32]。

综上所述, SLM 成形材料主要针对航空航天工业、生物医学领域中最常见的材料进行研究,如铁基、镍基、钛基、铜基粉末。然而, SLM 成形还缺少对材料的多样性进行研究,如有关难熔金属、金属间化合物、金属基复合材料的 SLM 成形的报道并不多见。

结束语

选择性激光熔化成形技术的发展非常迅猛,深入研究 SLM 成形过程的关键理论问题对 SLM 技术的发展具有重要理论价值与现实意义,今后

表3 用于SLM直接成形的钛基金属粉末

粉末类型	粉末特性	成形效果	成形设备	研究机构
Ti	气雾化,球形粉;氧含量低于0.1%;平均粒径:45 μm ;松装密度:64%	成形出钛骨骼;相对密度:95%;抗拉强度:300MPa	自主研发	日本大阪大学, F. Abe ^[12]
Ti-6Al-7Nb	—	成形出致密的复杂杯状零件	德国 MCP-HEK	澳大利亚西部大学, T. Sercombe ^[28]
Ti-6Al-4V	气雾化球形粉;粒径:21 μm	拉伸强度约 1300MPa	德国 EOS M270	美国德克萨斯大学 ^[29]
	粒度范围:1~10 μm	成形出多孔钛合金牙齿植入件;杨氏模量:内部约 104GPa,外部约 77GPa	德国 EOS 设备:200W 光纤激光;氩气保护	意大利 Chieti-Pescara 大学, T. Traini ^[30]
	雾化粉,球形,粒度范围:5~50 μm ,半数以上粉末粒径小于 34.43 μm	为了研究微观组织演化,快速冷却产生了马氏体,成功地成形出一系列试样,微观硬度可达 479 \pm 42	自主研发的 LM 型设备,激光器为 IPG YLR-300SM Yb:YAG 光纤,连续模式激光最大可以达到 333W	比利时鲁汶大学, L. Thijs, J. P. Kruth ^[31]

表4 用于SLM直接成形的铜基金属粉末

粉末类型	粉末特性	成形效果	成形设备	研究机构
Cu-Cu3P-SCuP	混合粉	成形出模具与油泵;相对密度:82.2%	自主研发设备,配备 200W CO ₂ 激光器	新加坡国立大学, Y. Tang ^[33]
Cu-CuSn-CuP	混合粉	相对密度:86%;微观硬度:320HV	中国工程物理院研发设备,配制 2000W CO ₂ 激光器	南京航空航天大学,顾冬冬博士 ^[34]

的研究方向预计有:

(1) 球化方面,建立基于激光凝固多场耦合的热力学与动力学的解析模型,深入揭示球化形成机理;(2) 孔隙形成方面,研究孔隙形状、尺度、以及孔隙率的控制方法,建立致密与孔隙可控多孔金属零件的制造方法;(3) 成形材料方面,研究金属间化合物、难熔金属、稀有金属等材料的 SLM 成形特点及质量控制。

参考文献

- [1] Kruth J P, Froyen L, Van Vaerenbergh J, et al. Selective laser melting of iron-based powder. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 149(1-3):616-622.
- [2] Yang Y Q, Huang Y L, Wu W H. One-step shaping of NiTi biomaterial by selective laser melting - art. no. 68250C. *Lasers in Material Processing and Manufacturing Iii*, 2008, 6825:C8250-C8250, 8258.
- [3] Gu D D, Shen Y F. Balling phenomena during direct laser sintering of multi-component Cu-based metal powder. *Journal of Alloys and*

Compounds, 2007, 432(1-2):163-166.

[4] Nikolay K T, Sergei E M, Igor A Y, et al. Balling processes during selective laser treatment of powders. *Rapid Prototyping Journal*. 2004 (10):78-87.

[5] Gu D D, Shen Y F. Balling phenomena in direct laser sintering of stainless steel powder: Metallurgical mechanisms and control methods. *Materials & Design*, 2009, 30(8):2903-2910.

[6] Simchi A, Pohl H. Effects of laser sintering processing parameters on the microstructure and densification of iron powder. *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 2003, 359(1-2):119-128.

[7] Childs T H C, Hauser C, Badrossamay M. Mapping and modelling single scan track formation in direct metal selective laser melting. *Cirp Annals-Manufacturing Technology*, 2004, 53(1):191-194.

[8] Li R D, Shi Y S, Wang Z G, et al. Densification behavior of gas and water atomized 316L stainless steel powder during selective laser melting. *Applied Surface Science*, 2010, 256(13):4350-4356.

[9] Simchi A. Direct laser sintering of metal powders: Mechanism, kinetics and

microstructural features. *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 2006, 428(1-2):148-158.

[10] Meier H, Haberland C. Experimental studies on selective laser melting of metallic parts. *Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik*, 2008, 39(9):665-670.

[11] Gu D D, Shen Y F. Effects of processing parameters on consolidation and microstructure of W-Cu components by DMLS. *J Alloy Compd*, 2009, 473(1-2):107-115.

[12] Abe F, Santos E C, Kitamura Y, et al. Influence of forming conditions on the titanium model in rapid prototyping with the selective laser melting process. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 2003, 217(1):119-126.

[13] Shen Y F, Gu D D, Wu P. Development of porous 316L stainless steel with controllable microcellular features using selective laser melting. *Mater Sci Tech-Lond*, 2008, 24(12):1501-1505. (责编 夏宛)

本文有参考文献 34 篇,因篇幅所限,未能全部列出,读者如有需要,请向本刊编辑部索取。