

激光熔覆沉积成形NbMoTaTi 难熔高熵合金的组织与强度研究*

李青宇¹, 李涤尘¹, 张航¹, 张安峰¹, 梁景怡², 王兴理想¹, 闫浩祺¹

(1. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 西安 710049;

2. 西安交通大学金属材料强度国家重点实验室, 西安 710049)

[摘要] 通过激光熔覆沉积技术制备应用于航空航天工业的NbMoTaTi难熔高熵合金材料,通过X射线衍射判断出成形的合金晶体结构为体心立方的单相固溶体结构。高熵合金晶粒尺寸大多在2~12 μm之间;平均显微硬度为397.6HV,室温抗压强度为1301.83MPa,1000℃高温抗压强度只达到347.28MPa,其原因可能与激光熔覆沉积成形NbMoTaTi高熵合金的过程中产生的气孔、未熔化/不完全熔化的Ta粉末粒子和裂纹有关,需进一步研究。

关键词: 激光熔覆沉积;高熵合金;单相固溶体;高温压缩强度;裂纹

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.10.061



李青宇

博士研究生,主要从事激光熔覆沉积成形高熔点金属材料的研究。

随着航空航天工业的发展,诸如高超声速飞机、高超声速巡航导弹等出现,飞行器在大气层内高速飞

*基金项目:国家自然科学基金项目(51505366);中国博士后科学基金项目(2015M570827)。

行,当飞行速度超过5马赫(1马赫=340m/s)时,剧烈的气动加热环境对防热系统提出了轻质、低烧蚀和高效隔热的要求^[1]。而目前已建立的宏观热防护理论和现有的高温合金种类已经难以满足航空航天工业越来越严苛的要求。

现有合金类型多以一种质量分数超过50%的金属元素作为主元,通过添加少量其他元素作为副元以改善主元的综合力学性能,合金体系经过上千年的发展已经非常成熟,致使目前合金材料尤其是应用于航空航天工业中的难熔合金材料发展已经到了瓶颈期。目前主要用于固体燃料火箭发动机的喷管、高超声速飞行器鼻锥,机翼尖角的材料主要有两种:TZM(Mo-0.1Zr-0.5Ti)和HCM(1.1Hf-0.06C)合金。两种合金都未突破现有合金体系,其中耐热性能和高温综合力学性能较好的HCM合金在1315℃下,抗拉强度可达455MPa^[2]。

2004年,台湾学者叶均蔚教授与其团队^[3]提出了多主元合金(Multi-Principal Element Alloys, MPEAs)和高熵合金(High-Entropy Alloys, HEAs)的概念。高熵合金一般可以被定义为由5种或以上的元素按照5%~35%原子比例经过混合形成简单而无序的固溶体结构,通过热力学上的高熵效应使合金具备优异的综合力学性能。而随着研究的深入,各国研究人员发现三元和四元合金同样可以形成简单而无序的单相固溶体结构,如NbTiVZr、ZrNbHf高熵合金,因此主元数目大于或等于5已不再是定义高熵合金的严格条件。在难熔金属领域,美国空军实验室的Senkov等^[4-5]通过真空电弧熔炼的方法制备出了NbMoTaW和NbMoTaWV两种难熔高熵合金,在1600℃下的高温压缩强度分别为600MPa和479MPa。清华大学Han等^[6]通过真空电弧熔炼在NbMoTaW和NbMoTaWV难熔高熵合金中分

别添加了等摩尔的Ti元素,形成了TiNbMoTaW和TiNbMoTaWV难熔高熵合金,显著改善了NbMoTaW和NbMoTaWV两种难熔高熵合金在室温下的脆性。目前难熔高熵合金主要是通过真空电弧熔炼和粉末冶金两种方法制备,真空电弧熔炼成形的难熔高熵合金尺寸与形状受到限制,且合金内部一般内应力较大,成分偏析严重;粉末冶金同样受制于模具设计周期长、成本高、产品尺寸较小、形状不宜复杂等困难。距离在航空航天中大尺寸、复杂结构零件的制造应用还存在较远的距离。

激光熔覆沉积(Laser Cladding Deposition, LCD)技术作为一项新兴的技术手段,是以球形金属粉末为原材料,以高能束的激光为热源,先对三维模型数据进行布尔运算离散化分层,后根据数控加工路径信息将同轴送给的金属粉末逐层熔化堆积,累加成形的快速增材制造技术^[7]。该技术在成形大尺寸、复杂结构难熔金属材料方面具有无可比拟的优势:

- (1) 激光能量密度高,可以快速熔化钨、钨、钽、铪等难熔金属材料^[8];
- (2) 增材制造快速凝固的特性会使组织晶粒细小,成分微观偏析不明显,综合力学性能优异^[9];
- (3) 结合五轴增材复合功能通过调整工艺参数可实现各类尺寸、不同结构零件的制造。

波鸿鲁尔大学的Dobbelstein等^[10]虽然通过激光熔覆沉积工艺中重熔的技术手段制备出了NbMoTaW高熵合金,但未对其综合力学性能进行进一步的研究。受制于难熔材料粉末制备工艺的不成熟,在激光增材制造领域,国内通过激光熔覆沉积工艺制备难熔高熵合金的研究还较少。针对航空航天工业,本文通过将Nb、Mo、Ta、Ti 4种粉末等摩尔混合,通过激光熔覆沉积技术制备理论密度为 $10.89\text{g}/\text{cm}^3$ 的难熔合金材料,通过X射线衍射判断该合金是否属于高

熵合金,进一步对其晶粒尺寸大小和微观偏析程度进行了简单的分析,并对成形的样件进行了综合力学性能的测试。

试验及方法

同轴送粉的激光熔覆沉积系统为西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室自主研发的LCD-1000A型激光熔覆沉积系统,该系统采用激光器为功率 $0\sim 1000\text{W}$ 的JK802/1002Nd:YAG工业激光器,光斑直径为 $500\mu\text{m}$,采用氩气进行气体保护,设备水氧含量低于 80ppm 。

试验所需的材料包括由中航迈特粉冶科技(北京)有限公司提供的粒度范围在 $45\sim 105\mu\text{m}$ 的球形单质Ti粉(TA0 99.88%), $45\sim 150\mu\text{m}$ 的近球形单质Nb粉(99.78%)、Ta粉

(99.54%);由北京高德威金属科技开发有限责任公司提供的粒度范围在 $45\sim 70\mu\text{m}$ 的球形单质Mo粉。4种粉末的扫描电子显微镜照片如图1所示。基板材料为纯Mo,尺寸分别为 $150\text{mm}\times 100\text{mm}\times 5\text{mm}$ 和 $\phi 20\text{mm}\times 80\text{mm}$ 。

试验前首先通过电子分析天平分别称量出等摩尔的Nb、Mo、Ta、Ti 4种单质金属粉末,通过SYH系列三维运动混合机将4种单质金属单质粉末混合4h,使粉末达到充分的混合后将粉末放置于干燥温度为 120°C 的真空干燥箱中干燥8h,去除粉末中的水分以增强粉末的流动性;纯Mo基板表面用400目的砂纸进行打磨并用丙酮和酒精进行清洗,去除表面氧化膜和油渍。

4种材料的基本物理性质如表1所示,可知Ta元素的熔点和Ti元

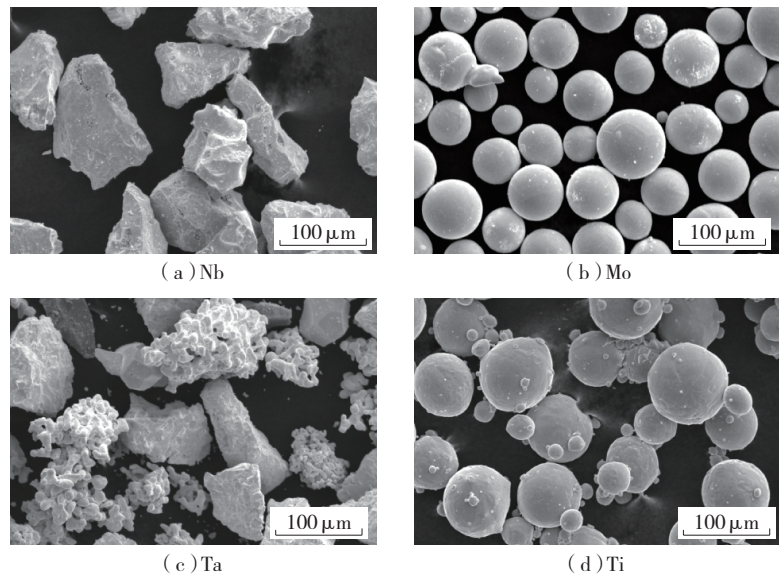


图1 Nb、Mo、Ta、Ti 4种金属粉末的扫描电子显微镜照片

Fig.1 Scanning electron microscope images of four metal powders: Nb, Mo, Ta, Ti

表1 合金中采用的4种材料的基本物理参数

金属元素	密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	相对原子质量 /u	熔点 / $^\circ\text{C}$	沸点 / $^\circ\text{C}$
Nb	8.57	92.9	2468	4742
Mo	10.2	95.94	2620	5560
Ta	16.65	180.9	2996	5424
Ti	4.54	22	1660	3287

素的沸点接近,随着激光功率密度增大,Ta粉末颗粒充分熔化的同时,Ti粉末颗粒会发生挥发,不仅会影响NbMoTaTi高熵合金4种元素的摩尔比例,并且钛蒸汽在透镜表面凝华形成细小的颗粒粉末,粉末吸收激光产生的热量易致使透镜开裂。

本试验中使用的Ta粉末平均粒径尺寸大于Ti粉末平均粒径,加大了Ta粉末颗粒完全熔化的同时Ti粉末颗粒不发生大量挥发的难度。送粉的激光功率密度计算公式为:

$$E=4\eta \cdot P/(\pi \cdot D \cdot V) \quad (1)$$

式中, E 为激光功率密度, J/mm^2 ; η 为材料对激光的吸收率; P 为激光功率, W ; D 为激光光斑直径, mm ; V 为激光扫描速度, mm/s 。

在激光光斑直径一定的前提下,激光功率密度主要由激光功率和扫描速度决定,因此设计如表2所示的激光功率和扫描速度的单因素试验共16组对工艺参数进行优化,在保证激光熔覆沉积成形样件具有一定尺寸精度的同时,Ta粉末颗粒尽可能充分熔化,而Ti粉末颗粒不发生大量的挥发。

通过KEYENCE-VH-600型电子光学显微镜对单因素试验结果进行观察比较未熔Ta颗粒数目,参考设备的污染情况和成形件的成形精度,确定激光熔覆沉积的最优工艺参数,通过Bruker D8 Advanced型X射线衍射仪的衍射结果判断形成的合金是否为单相固溶体结构,进而判断该合金是否是高熵合金;通过搭载背散射、元素能谱分析的场发射电镜对最优工艺参数下的合金的晶粒尺寸、元素偏析程度进行分析;通过显微硬度仪对最优工艺参数下的样件进行硬度测试;之后采用25kW中频感应加热器在600℃的感应加热温度下成形15mm×9mm×6mm的试验样件,通过线切割成 ϕ 4mm×6mm的圆柱,在25℃、1000℃下分别进行压缩试验。

结果分析与讨论

1 单因素试验结果分析比较

当扫描速度为6mm/s时,熔覆层虽然成形的尺寸精度满足力学样件的标准,但Ti粉末颗粒发生大量挥发,设备污染状况严重,如图2所示。故难以应用于多层数的力学样件成形方案中。

当扫描速度为12mm/s时,熔覆层表面面貌如图3所示,这是因为激光功率密度不足导致成形发生熔合不良,致使表面精度较差,故无法采用该速度下的激光功率进行成形试验。

当扫描速度为8mm/s、10mm/s时,成形尺寸精度达到试验要求,且Ti基本无挥发,如图4所示。为了比较Ta的熔化情况,首先在场发射电镜下通过元素能谱分析确定未熔颗粒是否为钽颗粒,进一步通过ImageJ软件在8组试验样件中随机各选取

10处 $260\mu m \times 260\mu m$ 的区域统计该区域内未熔钽颗粒和孔洞所占面积,最后用未熔Ta颗粒的面积除以整个区域面积减去孔洞面积的差来表征Ta颗粒熔化的充分程度,整个流程如图5所示。

通过计算比较可知,当激光功率480W,扫描速度8mm/s,Z轴提升量0.1mm,送粉量2.68g/min时,完全熔化的区域所占面积超过94.89%,样件成形精度、质量高,Ti有极少量的挥发。

2 NbMoTaTi合金的晶格参数计算

通过jade对X射线衍射结果进行分析,将所有衍射峰进行索引后标注,如图6所示。可以发现在不同的激光功率密度下,存在一定量未熔化的Ta颗粒、Mo颗粒产生的衍射峰,除此之外未检测到其他金属间化合物相的衍射峰,其余所有衍射峰分别与单一体心立方相一致对应,即Nb、Mo、Ta、Ti 4种单质金属元素熔化后

表2 激光功率和扫描速度单一因素试验表

激光功率 P/W	扫描速度 $v/(mm \cdot s^{-1})$	Z轴提升量/mm	送粉量 g/min
360,400,440,480	6,8,10,12	0.1	2.68



图2 被挥发的Ti污染的激光熔覆沉积系统
Fig.2 Laser cladding deposition system polluted by volatile Ti



图3 扫描速度为12mm/s的熔覆样件表面
Fig.3 Surface of the cladding sample when the scanning speed is 12mm/s



图4 扫描速度为8mm/s、10mm/s时的熔覆样件表面
Fig.4 Surface of the cladding samples when the scanning speed is 8mm/s, 10mm/s

形成了体心立方的单相固溶体结构,可以判断4种单质金属元素形成的合金属于高熵合金。

3 NbMoTaTi高熵合金的显微组织

对NbMoTaTi高熵合金的显微组织进行分析,从图7中可以看出NbMoTaTi高熵合金组织的晶粒大多在2~12 μm 之间,晶粒尺寸小于一般

通过真空电弧熔炼制备的难熔高熵合金^[4-6]。晶粒生长方式满足激光熔覆沉积定向凝固的原理,即与基板呈一定角度倾斜向上生长。晶界与晶粒间出现较小的微观偏析,晶粒内部成分的平均相对原子质量大于晶界处成分的平均相对原子质量,说明在快速凝固过程中,由于熔点的不对称

性导致熔点最高、相对原子质量最大的Ta元素先在晶粒内凝固,随后相对熔点较低的Nb、Mo、Ti元素金属在晶界处凝固产生了如图7所示的偏析。

4 NbMoTaTi高熵合金的硬度

对NbMoTaTi高熵合金进行硬度测试,结果如图8所示。纯Mo基底的平均显微硬度为219.6HV,结合面处平均显微硬度为257.4HV,随着熔覆层高度的不断增加,NbMoTaTi高熵合金的显微硬度未出现明显具有数学规律的变化,因此其平均显微硬度为397.6HV,高于4种金属单质中硬度最高的Ti(未经热处理的维氏显微硬度为230HV^[11])。这是由于高熵合金存在晶格畸变作用,即NbMoTaTi高熵合金为体心立方的单相固溶体,Nb、Mo、Ta、Ti各原子等概率的随机占据晶体中的各点阵位置,无溶剂原子与溶质原子的区别,易形成原子级别的力,因而具有较高的硬度。

5 NbMoTaTi高熵合金的室温力学性能与高温力学性能

分别在25 $^{\circ}\text{C}$ 、1000 $^{\circ}\text{C}$ 下对感应加热条件下成形NbMoTaTi高熵合金样件压缩试验,结果如图9所示,25 $^{\circ}\text{C}$ 下室温压缩强度为1301.83MPa;1000 $^{\circ}\text{C}$ 下高温压缩强度在达到

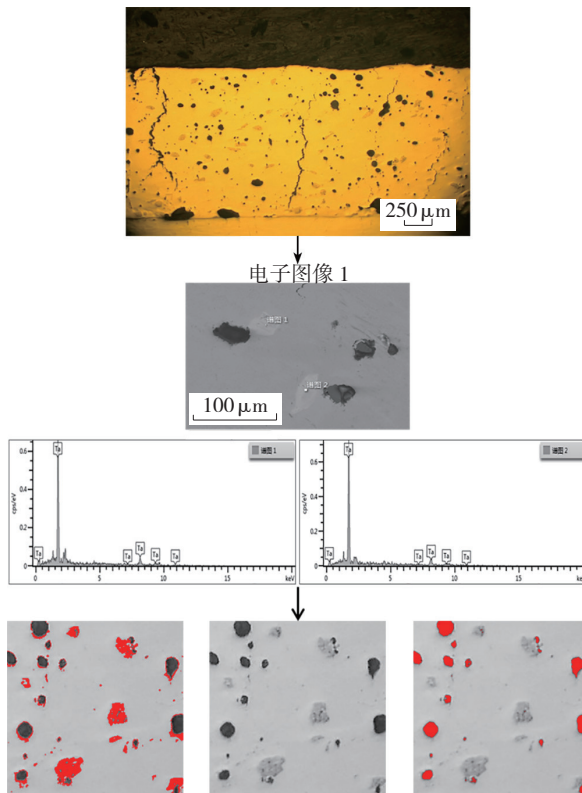


图5 未熔Ta颗粒统计方法流程框图

Fig.5 Flow chart of the statistical method of unmelted Ta particles

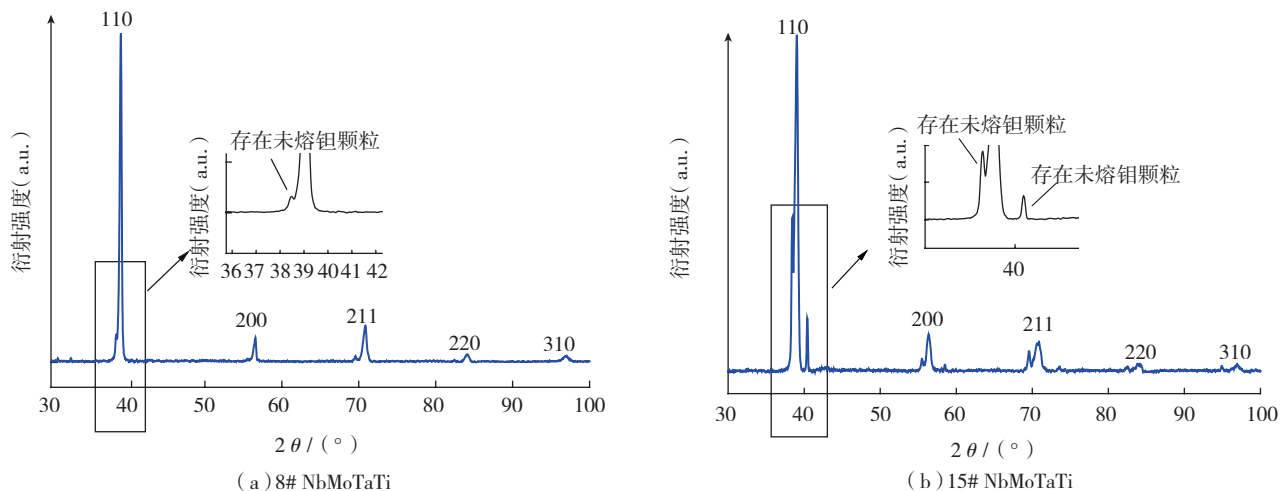


图6 不同激光功率密度下4种金属元素形成合金的X射线衍射结果

Fig.6 X-ray diffraction results of alloy formed by 4 metal elements under different laser power densities

347.28MPa 时样件发生突然碎裂,未展现出期望的高温力学性能。这是由于在激光熔覆沉积成形过程中出现了如图 10 所示的 3 类缺陷。

5.1 气孔

一般粉末的质量从粉末流动性、球形度和颗粒密度 3 方面进行评价,从粉末的电镜图可以看出, Ta 粉的球形度较差,颗粒密度较低; Nb 粉的球形度较差,但具有较高的颗粒密度; 钽粉和钼粉的球形度和颗粒密

度都较好。国内外学者^[12-13]一致认为,如果粉末的颗粒密度过低,粉末中存在大量孔隙,成形过程中保护气被吸附在孔隙中卷入成形件,会形成大量不规则随机分布的气孔。

为了对上述理论进行验证,采用相同工艺参数对颗粒密度较好的等摩尔的 Nb、Mo、Ti 元素进行激光熔覆沉积的成形,形成了单一体心立方结构的 NbMoTi 合金。其纵截面经抛光后电镜下结果如图 11 所示,气

孔接近完全消失,证明当粉末的颗粒密度较高时,激光熔覆沉积成形不易产生气孔。我国目前难熔金属粉末的制备工艺落后,诸如钽、钼、铌等难熔金属粉末材料还主要依赖于进口,这种现状大大限制了激光熔覆沉积制备高熵合金材料的发展。

5.2 未熔化/不完全熔化的 Ta 粉末粒子

由于 Ta 的熔点和 Ti 的沸点接近,且试验用的 Ta 粉末颗粒平均粒度远大于 Ti 粉末的平均粒度,难以做到在 Ta 元素完全熔化的同时 Ti 元素不发生挥发,因此成形样件中会存在少量未熔 Ta 颗粒,进一步影响到难熔高熵合金的组织均匀性和力学性能。需要通过预制 NbMoTaTi 的合金粉末,根据在合金成分确定的条件下合金的液相线温度确定的特性来消除未熔化/不完全熔化的 Ta 粉末粒子。

5.3 裂纹

NbMoTaTi 高熵合金成形过程中裂纹的产生主要有以下两方面因素:一方面,在焊接冶金学中,由于 4 种金属材料的熔点相差极大,这会形成一个较大的温度凝固区间,即 Ta 先发生凝固结晶,结晶偏析使低熔点元素富集于晶界,形成“液态薄膜”,薄膜凝固收缩后会受到拉应力,当拉应力超过材料本身的抗拉极限时产生裂纹。另一方面,4 种金属材料的熔点过高,即使通过感应加热的方法对基底进行预热,基底与熔覆层之间仍

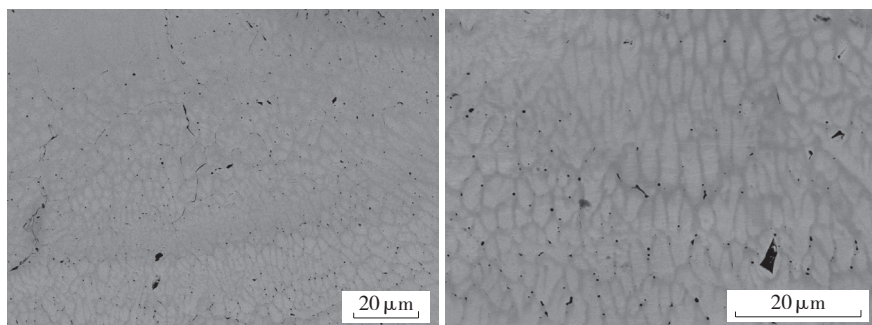


图7 NbMoTaTi高熵合金的背散射电子像图

Fig.7 Backscattered electron images of the NbMoTaTi high entropy alloy

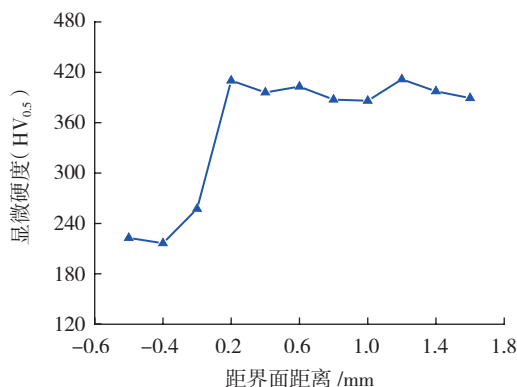


图8 NbMoTaTi高熵合金的硬度

Fig.8 Micro-hardness of NbMoTaTi high entropy alloy

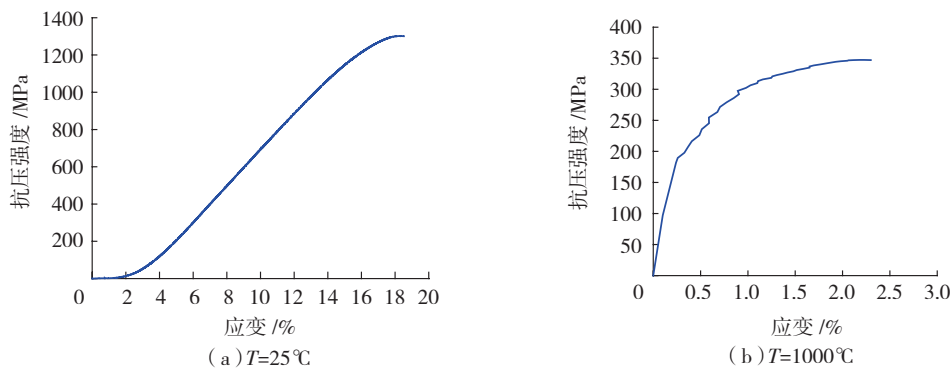


图9 NbMoTaTi高熵合金的室温力学性能与高温力学性能

Fig.9 Room temperature mechanical properties and high temperature mechanical properties of NbMoTaTi high entropy alloy

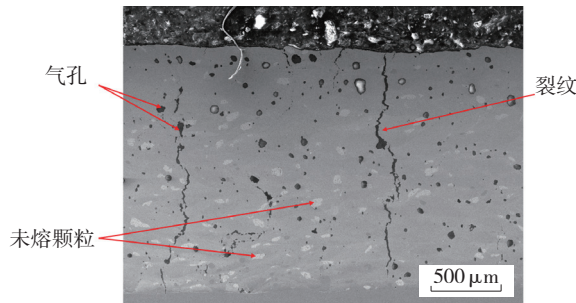


图10 NbMoTaTi高熵合金的缺陷
Fig.10 Defects of NbMoTaTi high entropy alloy

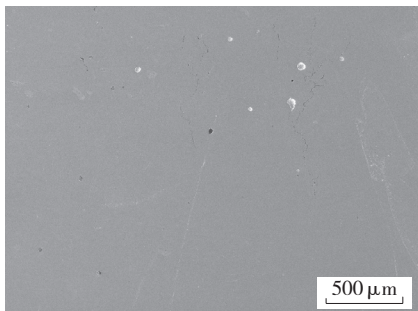


图11 NbMoTi合金激光熔覆沉积成形的纵表面

Fig.11 Longitudinal section of NbMoTi alloys formed by laser cladding deposition

然存在较大的温度梯度。且由于基板与熔覆层的弹性模量、热膨胀系数不同,因而易产生从基板贯穿样件的裂纹^[4]。通过红外温度仪测试可知,在成形过程中,基板的温度基本维持在600℃左右,而熔覆层的理论熔点达到将近3000℃,温度梯度达到了近2400℃。

为了消除裂纹缺陷,需要进一步通过数值模拟仿真和工艺参数优化试验确定在达到成形精度、组织结构要求前提下的最低熔化临界温度,并配合提高感应加热温度、激光空扫预热基板等减小熔覆层与基底间温度梯度的手段。在宏/微观尺度上分别控制高熔点高熵合金激光成形件的变形和裂纹,以确保成形样品的高温力学性能。

结论

本文的目标是通过激光熔覆沉积工艺制备应用于航空航天工业中

的难熔高熵合金材料。选取了Nb、Mo、Ta、Ti这4种金属单质粉末材料进行成形,最终得到了以下4点结论。

(1)通过单因素试验找到了成形NbMoTaTi合金的最优化工艺参数,并通过X射线衍射结果判断出成形的合金属于体心立方结构的单相固溶体,属于高熵合金。

(2)由于激光增材制造快速凝固的特性,通过激光熔覆沉积工艺成形NbMoTaTi高熵合金的组织晶粒细小,晶粒尺寸大多在2~12μm之间,成分偏析不明显。

(3)NbMoTaTi难熔高熵合金未展现出理想期望中的高温力学性能,其平均显微硬度为397.6HV;25℃下室温压缩强度为1301.83MPa,1000℃下高温压缩强度达到347.28MPa时样品发生碎裂。

(4)激光熔覆沉积工艺成形NbMoTaTi高熵合金时,易产生气孔、未熔化/不完全熔化的Ta粉末粒子、裂纹3大类缺陷,这些缺陷可能是影响合金高温力学性能的关键因素。其中验证了气孔可以通过提高粉末的颗粒密度加以消除。

参考文献

[1] 蒋凌澜,张利嵩.功能梯度防热材料在高超声速飞行器热防护上的设计研究[J].导弹与航天运载技术,2015(3):16-21.
JIANG Linglan, ZHANG Lisong. Design of functionally graded materials for thermal protection of hypersonic vehicle[J]. Missiles and

Space Vehicles, 2015(3): 16-21.

[2] 郑欣,白润,王东辉,等.航天航空用难熔金属材料的研究进展[J].稀有金属材料与工程,2011,40(10):1871-1875.

ZHENG Xin, BAI Run, WANG Donghui, et al. Research progress on refractory metal materials for aerospace[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40(10): 1871-1875.

[3] YE J W, CHEN S K, LIN S J, et al. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes[J]. Advanced Engineering Materials, 2004, 6(5): 299-303.

[4] SENKOV O N, WILKS G B, MIRACLE D B, et al. Refractory high-entropy alloys[J]. Intermetallics, 2010, 18(9): 1758-1765.

[5] SENKOV O N, WILKS G B, SCOTT J M, et al. Mechanical properties of Nb₂₅Mo₂₅Ta₂₅W₂₅ and V₂₀Nb₂₀Mo₂₀Ta₂₀W₂₀ refractory high entropy alloys[R]. Intermetallics, 2011, 19(5): 698-706.

[6] HAN Z D, CHEN N, ZHAO S F, et al. Effect of Ti additions on mechanical properties of NbMoTaW and VNbMoTaW refractory high entropy alloys[J]. Intermetallics, 2017, 84: 153-157.

[7] 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,2016,59(22):16-22.

ZHANG Anfeng, LI Dichen, LIANG Shaoduan, et al. Research progress of laser additive manufacturing technology for high performance metal parts[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(22): 16-22.

[8] 李涤尘,贺健康,田小永,等.增材制造:实现宏微结构一体化制造[J].机械工程学报,2013,49(6):129-135.

LI Dichen, HE Jiankang, TIAN Xiaoyong, et al. Additive manufacturing: integrated fabrication of macro/microstructures[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(6): 129-135.

[9] 王华明,张凌云,李安,等.高性能航空金属结构材料及特种涂层激光熔覆沉积制备与成形研究进展[J].金属热处理,2008,33(1):82-85.

WANG Huaming, ZHANG Lingyun, LI An, et al. Progress on laser melting deposition processing and manufacturing of advanced aeronautical metallic structural materials and coatings[J]. Heat Treatment of Metals, 2008, 33(1): 82-85.

- [10] DOBBELSTEIN H, THIELE M, GUREVICH E L, et al. Direct metal deposition of refractory high entropy alloy MoNbTaW[J]. Physics Procedia, 2016, 83: 624–633.
- [11] 王桂生, 田荣璋. 钛的应用技术[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2007.
- WANG Guisheng, TIAN Rongzhang. Applications of titanium[M]. Changsha: Central South University Press, 2007.
- [12] QI H, AZER M, RITTER A. Studies of standard heat treatment effects on microstructure and mechanical properties of laser net shape manufactured Inconel 718[J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 2009, 40(10): 2410–2422.
- [13] 张凤英, 陈静, 谭华, 等. 钛合金激光快速成形过程中缺陷形成机理研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(2): 211–215.
- ZHANG Fengying, CHEN Jing, TAN Hua, et al. Study on the formation mechanism of defects in the rapid forming process of titanium alloy laser[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(2): 211–215.
- [14] 陈志坤, 刘敏, 曾德长, 等. 激光熔覆裂纹的产生原因及消除方法探究[J]. 激光杂志, 2009, 30(1): 55–57.
- CHEN Zhikun, LIU Min, ZENG Dechang, et al. Research on formation causes and elimination methods of the laser cladding cracks[J]. Laser Journal, 2009, 30(1): 55–57.

通讯作者: 李涤尘, 博士、教授、长江学者特聘教授, 研究方向为增材制造技术、生物制造技术、增材制造应用技术等, E-mail: dcli@mail.xjtu.edu.cn。

Study on Structure and Strength of NbMoTaTi Refractory High Entropy Alloy Fabricated by Laser Cladding Deposition

LI Qingyu¹, LI Dichen¹, ZHANG Hang¹, ZHANG Anfeng¹, LIANG Jingyi², WANG Xinglixiang¹, YAN Haoqi¹

(1. State Key Laboratory for Manufacturing System Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. State Key Laboratory for Mechanical Behavior Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

[ABSTRACT] The paper is to prepare the refractory high entropy alloy, NbMoTaTi, in aerospace industry by laser cladding deposition technology. The crystal structure of the alloy is single phase solid solution structure of BCC analyzed by X-ray diffraction. The grain size of the NbMoTaTi high entropy alloy is mostly between 2–12 μm . The average micro-hardness is 397.6HV and the room temperature compression strength is 1301.83MPa. The high temperature compression strength under 1000 $^{\circ}\text{C}$ is only 347.28MPa because of the defects such as pores, without /incomplete melting Ta powder particles and cracks generated during the forming process of NbMoTaTi high entropy alloys, so further research is needed.

Keywords: Laser cladding deposition; High entropy alloy; Single phase solid solution; High temperature compression strength; Crack

(责编 铃兰)

(上接第 60 页)

Research Progress on Selective Laser Melting of Nickel Based Superalloy

WANG Di¹, QIAN Zeyu¹, DOU Wenhao¹, YANG Yongqiang¹, LI Sheng², BAI Yuchao¹, XIAO Zefeng¹
(1. School of Mechanical and Automobile Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;
2. School of Metallurgy and Materials, The University of Birmingham, Birmingham B152TT, UK)

[ABSTRACT] High temperature nickel base alloy is one of the most important high-temperature alloy materials in the aerospace field, which has excellent fatigue resistance and creep characteristics under high temperature and high-pressure conditions. In this paper, we summarized the research progress on rapid manufacturing of high temperature nickel base alloy parts through laser powder bed fusion at home and abroad. First the authors systematically introduced several mature nickel base superalloys and that are still during development of nickel base alloy, then summarizes microstructure and defects characteristics of the SLMed nickel base alloy, and the corresponding changes of microstructure and mechanical properties after heat treatment. At last, several existing hot issues are also listed for SLM fabrication of nickel base alloy.

Keywords: Selective laser melting; High temperature nickel based superalloy; Microstructure; Heat treatment; Mechanical property

(责编 铃兰)