

# 元素添加方式对激光熔覆沉积 Ti-25V-15Cr 成形性的影响

胡腾腾, 张凤英, 邱莹, 王坤, 王刚, 杨二凯

(长安大学 材料学院, 西安 710064)

**摘要:** **目的** 以阻燃钛合金 Ti-25V-15Cr 为研究对象, 主要研究 V、Cr 元素粉末的添加方式对激光熔覆沉积 Ti-25V-15Cr 合金的显微组织及成形性的影响。**方法** 分别以经过粘结包覆 Ti(150 μm)+V(15 μm)+Cr(15 μm)、直接混合 Ti(150 μm)+V(15 μm)+Cr(15 μm)以及直接混合 Ti(150 μm)+V(100 μm)+Cr(150 μm)的元素混合粉末为原料, 进行激光熔覆沉积实验, 对沉积试样的高度、宽度以及显微组织特征进行研究。**结果** 以粘结包覆 Ti(150 μm)+V(15 μm)+Cr(15 μm)和直接混合 Ti(150 μm)+V(100 μm)+Cr(150 μm)为原料获得的沉积试样, 其沉积效率显著高于直接混合 Ti(150 μm)+V(15 μm)+Cr(15 μm)为原料的沉积试样, 且沉积试样组织由相对细小的等轴晶和类等轴晶组成, 而直接混合 Ti(150 μm)+V(15 μm)+Cr(15 μm)为原料的试样组织主要由外延生长的柱状晶组成。**结论** 以粘结包覆 Ti(150 μm)+V(15 μm)+Cr(15 μm)为原材料时, 在提高沉积效率的同时能够一定程度上细化晶粒。该方法对激光熔覆沉积材料的成形性、成分均匀性及显微组织具有显著影响。

**关键词:** 激光熔覆沉积; Ti-25V-15Cr; 粘结剂包覆法; 显微组织; 成形性; 沉积效率

**中图分类号:** TG174.44 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)05-0116-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.05.018

## Effect of Element Addition Method on Formability and Microstructure of Laser Cladding Deposited Ti-25V-15Cr Alloy

HU Teng-teng, ZHANG Feng-ying, QIU Ying, WANG Kun, WANG Gang, YANG Er-kai

(School of Materials, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**ABSTRACT:** The work aims to investigate the effect of the addition method of elemental powders V and Cr on the microstructure and formability of laser cladding deposited Ti-25V-15Cr alloy with Ti-25V-15Cr alloy as research subject. The deposition experiments were performed from three kinds of powder feedstock, including bonded coated Ti(150 μm)+V(15 μm)+Cr(15 μm), directly mixed Ti(150 μm)+V(15 μm)+Cr(15 μm) and directly mixed Ti(150 μm)+V(100 μm)+Cr(150 μm), and the height,

收稿日期: 2018-12-04; 修订日期: 2019-04-04

Received: 2018-12-04; Revised: 2019-04-04

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0700301); 中央高校基本科研业务费项目(300102319208, 300102319301); 大学生创新创业训练项目(201810710119)

**Fund:** Supported by the National Key Research and Development Program of China (2016YFB0700301), Fundamental Research Funds for the Central Universities (300102319208, 300102319301), National Training Program of Innovation and Entrepreneurship for Undergraduates (201810710119)

作者简介: 胡腾腾(1992—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为激光增材制造。

**Biography:** HU Teng-teng (1992—), Male, Master student, Research focus: laser additive manufacturing.

通讯作者: 张凤英(1980—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为激光增材制造。邮箱: zhangfengying@chd.edu.cn

**Corresponding author:** ZHANG Feng-ying (1980—), Female, Doctor, Professor, Research focus: laser additive manufacturing. E-mail: zhangfengying@chd.edu.cn

width and microstructure of the deposited samples were analyzed. Deposited efficiency of the samples from the bonded coated Ti (150  $\mu\text{m}$ )+V(15  $\mu\text{m}$ )+Cr(15  $\mu\text{m}$ ) and directly mixed Ti(150  $\mu\text{m}$ )+V(100  $\mu\text{m}$ )+Cr(150  $\mu\text{m}$ ) were much higher than that from the directly mixed Ti(150  $\mu\text{m}$ )+V(15  $\mu\text{m}$ )+Cr(15  $\mu\text{m}$ ). The microstructure of the deposited samples from Ti(150  $\mu\text{m}$ )+V(15  $\mu\text{m}$ )+Cr(15  $\mu\text{m}$ ) and from directly mixed Ti(150  $\mu\text{m}$ )+V(100  $\mu\text{m}$ )+Cr(150  $\mu\text{m}$ ) were mainly composed of fine equiaxed grains and near-equiaxed grains, while that from the directly mixed Ti(150  $\mu\text{m}$ )+V(15  $\mu\text{m}$ )+Cr(15  $\mu\text{m}$ ) consisted of epitaxially columnar grains. When the bonded coated Ti (150  $\mu\text{m}$ ) + V (15  $\mu\text{m}$ ) + Cr (15  $\mu\text{m}$ ) is used as the deposited material, the grain size can be refined to some extent while the deposition efficiency can be improved. This method has a significant influence on the formability, composition uniformity and microstructure of the laser cladding deposited samples.

**KEY WORDS:** laser cladding deposition; Ti-25V-15Cr; bond coating method; microstructure, formability; deposition efficiency

激光熔覆沉积 (Laser Cladding Deposition) 是一种新型增材制造技术, 其典型过程为: 将三维 CAD 模型按一定厚度切片分层, 然后转换成一系列二维轮廓, 利用高能激光束在基材表面形成熔池, 同时将粉末实时送入运动的熔池, 按一定的填充路径逐点逐层堆积, 从而形成三维实体零件。激光熔覆沉积是以数字化制造为基础, 将材料逐层堆积制造出实体零件的新兴制造技术, 实现了制造方式从等材、减材到增材的重大理念和模式, 是先进增材制造的重要组成部分<sup>[1-2]</sup>。由于激光熔覆沉积在激光修复<sup>[3-5]</sup>、成形制造等方面具有广阔的应用前景, 引起了国内外研究学者的广泛关注。

激光熔覆沉积不只局限于传统增材制造, 在以元素粉末为原料进行激光增材制造时, 由于小熔池逐点堆积沉积过程, 使混合元素法激光增材制造成为新材料以及送粉增材制造专用合金的研究方法, 有望建立与增材制造工艺相适应的专用材料体系, 推动增材制造标准和认证体系的完善。国内外针对混合元素法激光增材制造、激光熔覆沉积已开展相关研究。张凤英等<sup>[6]</sup>以混合的 Ti、V、Cr 元素粉末为原料, 进行了激光熔覆沉积 Ti-20V-15Cr 合金的组织演化与硬度的研究, 解释了沉积层显微组织、冶金质量以及显微硬度的形成机理。Hamid Azizi 等<sup>[7]</sup>以元素粉末为原料, 通过选区激光熔融增材制备新型 Ti-Al-V-Fe 合金, 从而揭示了元素粉末对选区激光熔融合金试样微观结构的影响。Fraser 等<sup>[8-9]</sup>采用元素混合法激光立体成形技术, 分析了 Ti-xAl、Ti-xMo ( $0 \leq x \leq 25$ ) 合金成分梯度试样在成形过程中的成分及组织特征。目前, 针对混合元素法激光熔覆沉积的研究主要集中于上述方面。实际上, 在沉积过程中, 原材料的混合方式、元素的添加方式对激光熔覆沉积过程及成形后的组织有一定影响, 而针对该领域研究的相关报道较少。Marco Simonelli 等<sup>[10]</sup>使用直接混合及粘结包覆的混粉方式, 通过选区激光熔覆沉积技术制备 Ti-6Al-4V 合金, 研究了两种混粉方式对沉积后 Ti-6Al-4V 组织的影响, 揭示了粉末混合特性对激光能量及凝固组织的影响。

基于此, 本研究主要针对元素粉末的添加方式对

激光熔覆沉积成形性及显微组织的影响展开研究。由于 Ti-25V-15Cr 是一种典型的阻燃钛合金, 在航空航天领域具有重要应用及发展前景<sup>[11-12]</sup>, 本研究拟以 Ti-25V-15Cr 阻燃钛合金为研究对象, 以不同混合方式获得的 60%Ti+25%V+15%Cr (质量分数) 混合粉末为原料, 采用激光熔覆沉积制备 Ti-25V-15Cr 合金, 旨在明确元素粉末混合方式对激光熔覆沉积 Ti-25V-15Cr 合金的成形性、沉积效率以及显微组织的影响。

## 1 实验

激光熔覆沉积材料为粒径范围 75~150  $\mu\text{m}$  的纯 Ti 粉 (图 1a)、40~100  $\mu\text{m}$  的粗 V 粉 (图 1b)、40~150  $\mu\text{m}$  的粗 Cr 粉 (图 1c)、5~15  $\mu\text{m}$  的细 V 粉 (图 1d) 和 5~15  $\mu\text{m}$  的细 Cr 粉 (图 1e), 为了研究方便, 便于区分粗粉和细粉, 本研究以 150  $\mu\text{m}$  (Ti) 表示 Ti 粉, 100  $\mu\text{m}$  (V) 表示粗 V 粉, 150  $\mu\text{m}$  (Cr) 表示粗 Cr 粉, 15  $\mu\text{m}$  (V) 表示细 V 粉, 15  $\mu\text{m}$  (Cr) 表示细 Cr 粉。分别采用粘结剂包覆法和直接混合法制备三组 Ti-25V-15Cr 原料, 包括粘结包覆 Ti(150  $\mu\text{m}$ )+V(15  $\mu\text{m}$ )+Cr(15  $\mu\text{m}$ ) (Ti 粉表面裹覆细 V 粉和细 Cr 粉, 如图 1f 所示)、直接混合 Ti(150  $\mu\text{m}$ )+V(100  $\mu\text{m}$ )+Cr(150  $\mu\text{m}$ ) (Ti 粉+粗 V 粉+粗 Cr 粉, 如图 1g 所示) 以及直接混合 Ti(150  $\mu\text{m}$ )+V(15  $\mu\text{m}$ )+Cr(15  $\mu\text{m}$ ) (Ti 粉+细 V 粉+细 Cr 粉, 如图 1h 所示)。在粘结剂包覆时, 将 Ti(150  $\mu\text{m}$ )、V(15  $\mu\text{m}$ )、Cr(15  $\mu\text{m}$ ) 三种粉末按照 60%Ti+25%V+15%Cr 比例在混料器中混合 20 min, 同时在混合过程中加入 2% (质量分数) 的聚乙烯醇 (PVA) 水溶液粘合剂, 最后将粉末混合物在 400 K 真空烘箱中干燥 12 h。直接混合时, 将 Ti(150  $\mu\text{m}$ )、V(15  $\mu\text{m}$ )、Cr(15  $\mu\text{m}$ ) 和 Ti(150  $\mu\text{m}$ )、V(100  $\mu\text{m}$ )、Cr(150  $\mu\text{m}$ ) 的两组粉末按照 60%Ti+25%V+15%Cr 比例在混合器中充分混合。相比于图 1g、h, 图 1f 中粘结剂包覆使得 Cr、V 均匀且致密地包覆在 Ti 粉表面, 同时在旁边有少量较大颗粒散落。

本实验在如图 2a 所示的成套激光熔覆沉积设备上完成<sup>[13]</sup>, 该系统由波长为 1070 nm 的 IPG 2 kW 光

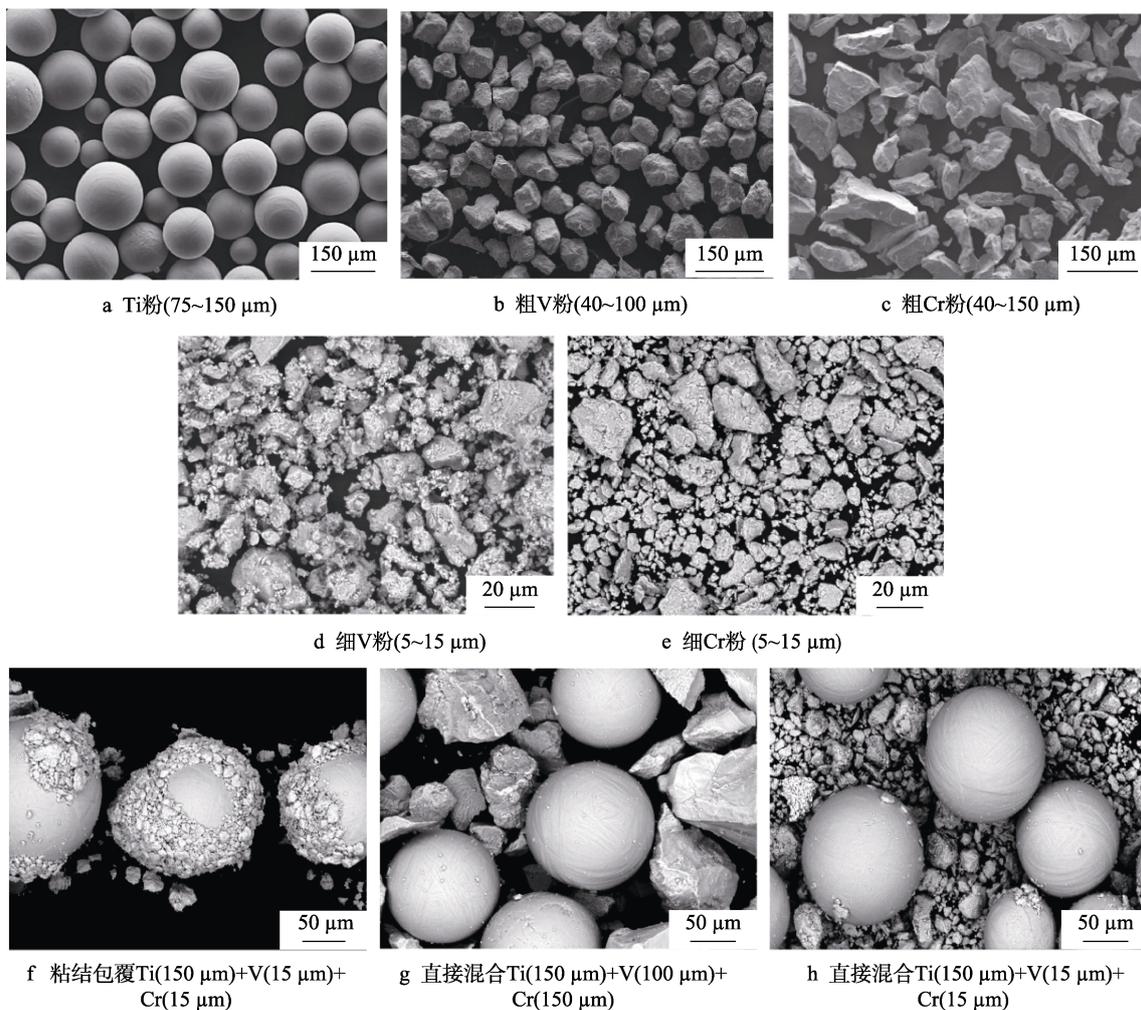


图1 Ti、V、Cr 粉末及三种混合后的粉末 SEM 形貌

Fig.1 Morphology of Ti, V, Cr powder and three mixed powders under SEM: (a) Ti; (b, d) V; (c, e)Cr; (f) bond-coating Ti(150 μm)+V(15 μm)+Cr(15 μm); (g) Direct mixing of Ti(150 μm) +V(100 μm)+Cr(150 μm); (h) Direct mixing of Ti(150 μm)+V(15 μm)+Cr(15 μm)

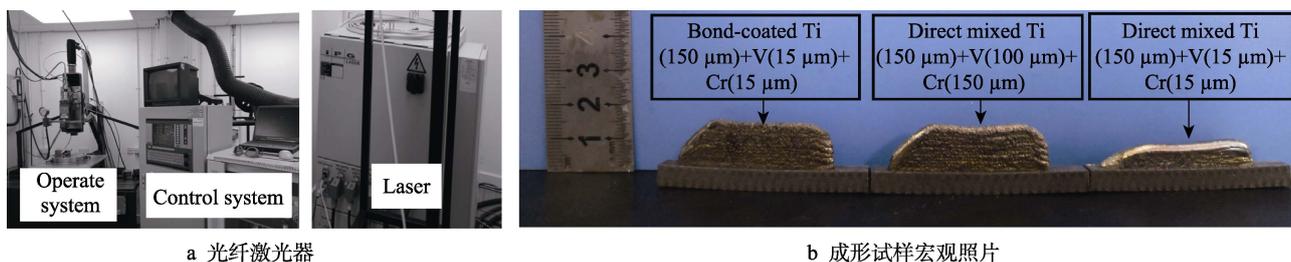


图2 光纤激光器及激光熔覆沉积试样的宏观照片

Fig.2 Equipment of fiber laser (a) and macrophotograph of laser cladding deposition samples (b)

纤激光器、数控工作台、高精度粉末送粉器和侧向喷嘴组成。实验所用基材为几何尺寸 140 mm×60 mm×6 mm 的 TC4 板材，用砂纸打磨基材表面，然后用无水乙醇和丙酮依次清洗干净。激光熔覆沉积过程中，激光入射至基体表面形成熔池。载粉气流运载粉末颗粒（载粉气为氩气，流量为 10 L/min），将粉末颗粒从送粉器输送至侧向送粉喷嘴，并同步送入到运动的激光熔池中。粉末颗粒在熔池内经历熔化、凝固过程，形成沉

积层。每按预定轨迹完成一层沉积，Z 轴抬升 0.8 mm（Z 轴抬升量  $\Delta Z=0.8$  mm）。为防止钛合金在沉积过程中发生氧化，整个熔覆沉积过程在充满氩气的惰性气氛中进行。表 1 为本研究所采用的主要激光熔覆沉积工艺参数。图 2b 为沉积相同层数（14 层）的条件下，基于高能激光束沉积得到的三种板状 Ti-25V-15Cr 合金试样。

采用线切割将沉积试样沿平行于扫描方向切

表 1 激光熔覆沉积工艺参数  
Tab.1 Processing parameters of LCD Ti-25V-15Cr alloy

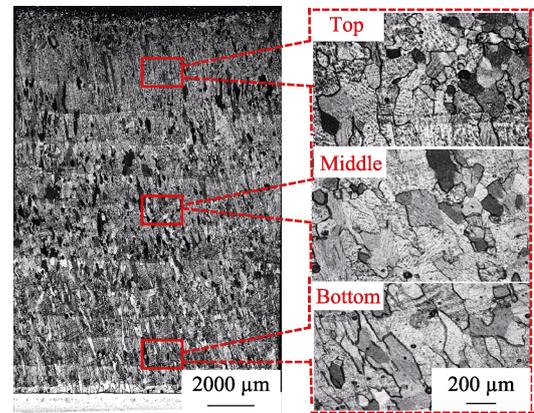
Laser power/W	Scanning speed/(mm·s <sup>-1</sup> )	Spot diameter/mm	Powder feed rate/(g·min <sup>-1</sup> )	Carrier gas flow rate/(L·min <sup>-1</sup> )	ΔZ/mm
1500	8	4	20	10	0.8

取, 经过打磨、抛光后, 利用 Kroll 试剂 (1% HF + 3% HNO<sub>3</sub> + 20% H<sub>2</sub>O, 体积分数) 进行腐蚀。最后, 利用 OLYMPUS-PMG3 金相显微镜、Hitachi-S4800 扫描电子显微镜进行微观组织分析。同时, 使用 IPP (Image-Pro Plus) 软件测量试样显微组织的尺寸, 采用游标卡尺对沉积试样的高度及宽度进行精确测量。

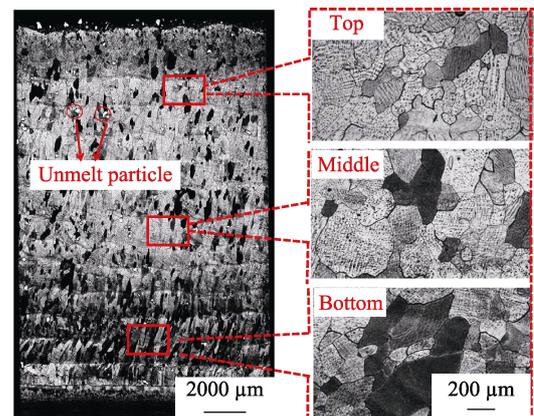
## 2 结果及分析

### 2.1 元素添加方式对组织的影响

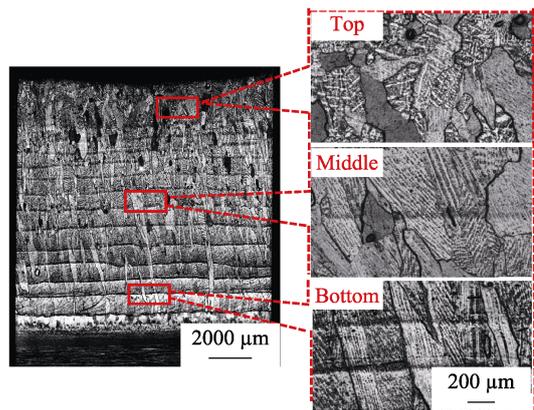
图 3 显示了分别采用三种混合粉末为原料时, 激光熔覆沉积 Ti-25V-15Cr 合金的显微组织特征。图 3a 为以粘结包覆 Ti(150 μm)+V(15 μm)+Cr(15 μm)粉末为原料, 激光熔覆沉积 Ti-25V-15Cr 合金的宏观形貌及局部高倍显微组织。从宏观形貌可以看出, 沉积试样的底部区域至上部区域由明暗相间的细小等轴晶组成, 沉积层清晰且层间形成了良好的冶金结合。从局部高倍组织可以看出, 沉积试样底部由细小的类等轴晶组成, 测量得到等轴晶的平均晶粒宽度约 80 μm。随着沉积高度的增加, 到达沉积试样中部区域时, 类等轴晶开始向等轴晶转变, 局部区域由尺寸为 106 μm 的较大等轴晶组成。从沉积试样上部区域的晶粒形态可以看出, 随着沉积层数的增加, 晶粒尺寸减小, 且上部区域主要由尺寸约 70 μm 的较小等轴晶组成。图 3b 显示了直接混合 Ti(150 μm)+V(100 μm)+Cr(150 μm)后激光熔覆沉积 Ti-25V-15Cr 合金的宏观形貌及局部高倍显微组织。与粘结包覆相比, 该沉积试样的底部和中部区域由类等轴晶和少量等轴晶组成, 且晶粒尺寸增加。类等轴晶的平均宽度为 118 μm, 平均长度为 324 μm。沉积试样的上部区域由直径约为 67 μm 的细小等轴晶和少量的类等轴晶组成。从图 3c 中可以看出, 直接混合 Ti(150 μm)+V(15 μm)+Cr(15 μm)为原料, 激光熔覆沉积 Ti-25V-15Cr 合金的宏观形貌及局部高倍显微组织发生了显著变化。如图 3 所示, 沉积试样底部到上部区域由外延生长的柱状晶和少量的类等轴晶组成。由局部高倍组织可以看出, 沉积试样底部和中部区域由平均宽度为 290 μm、平均长度为 1200 μm 的外延生长的柱状晶组成。随着沉积高度的增加, 沉积试样的上部区域 (最后沉积的 2—3 层) 由外延生长的柱状晶和少量的类等轴晶组成。柱状晶长度和宽度随着沉积层数的增加而逐渐减少, 其柱状晶的平均宽度为 138 μm, 平均长度为 412 μm。



a 粘结包覆Ti(150 μm)+V(15 μm)+Cr(15 μm)为原料的试样



b 直接混合Ti(150 μm)+V(100 μm)+Cr(150 μm)为原料的试样



c 直接混合Ti(150 μm)+V(15 μm)+Cr(15 μm)为原料的试样

图 3 粉末经过粘结包覆、直接混合后激光熔覆沉积 Ti-25V-15Cr 合金从底部到顶部的宏观形貌及局部高倍显微组织

Fig.3 Macrostructure morphology and local high-magnification microstructure of the Ti-25V-15Cr alloy deposited from the bottom to the top by laser cladding deposition: (a) bonded coating Ti(150 μm)+V(15 μm)+Cr(15 μm); (b) direct mixing Ti(150 μm)+V(100 μm)+Cr(150 μm); (c) direct mixing Ti(150 μm)+V(15 μm)+Cr(15 μm)

## 2.2 元素添加方式对沉积效率的影响

以粘结包覆 Ti(150 μm)+V(15 μm)+Cr(15 μm)、直接混合 Ti(150 μm)+V(100 μm)+Cr(150 μm)以及直接混合 Ti(150 μm)+V(15 μm)+Cr(15 μm)粉末为原料,激光熔覆沉积相同的层数后,各沉积试样的沉积高度及宽度如图4所示。由图4可知,当沉积层数相同时,粘结包覆 Ti(150 μm)+V(15 μm)+Cr(15 μm)和直接混合 Ti(150 μm)+V(100 μm)+Cr(150 μm)为原料的激光熔覆沉积 Ti-25V-15Cr 合金的沉积高度和宽度基本相等,等效高度为 12.5 mm,等效宽度为 3.9 mm (本研究中将等效高度定义为沉积相同层数时,沉积开始至结束的高度;等效宽度定义为沉积完成后沉积试样的厚度)。和上述两种粉末添加方式相比,直接混合 Ti(150 μm)+V(15 μm)+Cr(15 μm)为原料时,激光熔覆沉积 Ti-25V-15Cr 合金的高度显著降低,等效高度为 6.4 mm,约为上述两种粉末沉积试样高度的 50%,但宽度略有增加,增加到 4.18 mm。

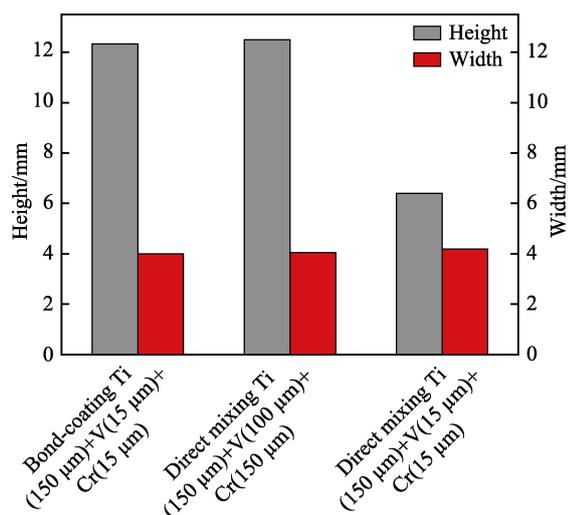


图4 不同粉末为原料沉积相同的层数时各沉积试样的沉积高度及宽度

Fig.4 Deposition height and width of deposited samples with same layers deposited from different powders

## 3 讨论

首先基于激光熔池内的凝固条件对激光熔覆沉积 Ti-25V-15Cr 合金的凝固组织形成过程进行分析。图5显示了采用林鑫<sup>[14]</sup>建立的柱状晶/等轴晶转变 (Columnar to equiaxed transition, CET) 模型计算获得的 Ti-25V-15Cr 合金柱状晶/等轴晶转变临界条件,图中曲线是熔池底部到顶部凝固条件的变化趋势,阴影区域表示激光熔覆沉积常用的凝固参数范围。从图5可以看出,熔池底部由于凝固速度为0,而温度梯度最高,因此有利于柱状晶的生长;而在熔池顶部区域,由于温度梯度显著降低,而凝固速度逐渐提高,

所以激光熔覆沉积 Ti-25V-15Cr 合金的熔覆层顶部易于形成等轴晶。在多层沉积过程中,熔覆层顶部形成的等轴晶层往往在沉积下一层时被激光重熔,从而导致柱状晶连续外延生长,因此激光多层沉积试样的凝固组织主要由外延生长的柱状晶组成,局部存在少量残留等轴晶粒。仅在沉积试样的最顶部,未被重熔的等轴晶层保留下来。以直接混合 Ti(150 μm)+V(15 μm)+Cr(15 μm)为原料进行激光熔覆沉积时,由于高熔点 V、Cr 粉末的粒径极小,在输送至熔池区域时,容易被充分熔化,所以粉末不会进入熔池底部固液界面前沿而影响凝固组织形成。因而采用直接混合 Ti(150 μm)+V(15 μm)+Cr(15 μm)为原料时,熔覆层凝固组织主要由外延生长的柱状晶和少量等轴晶粒组成,仅在试样最顶部保留一层等轴晶层。

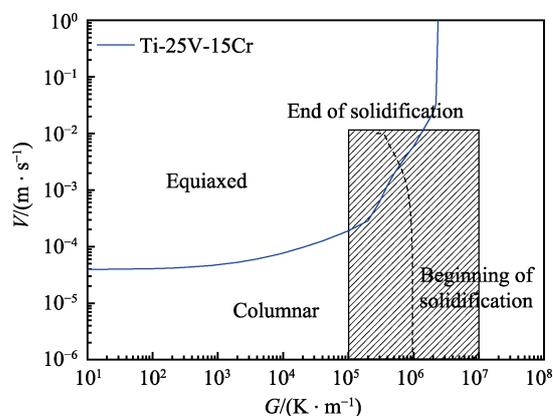


图5 Ti-25V-15Cr 合金的柱状晶/等轴晶转变模型  
Fig.5 CET curves for Ti-25V-15Cr showing the regions of columnar dendrites and equiaxed dendrites as a function of solidification parameters  $G$  and  $VS$  ( $N_0=2 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$ ,  $\Delta T_n=2.5 \text{ }^\circ\text{C}$ )

以粘结包覆 Ti(150 μm)+V(15 μm)+Cr(15 μm)为原料时,由于 Cr、V 粉末均匀致密地包覆于 Ti 粉表面,在沉积过程中,V、Cr 粉末将随粗大 Ti 颗粒以较快速度突破熔池固液界面,并能到达局部熔池固液界面前沿,同时由于 Cr、V 粉末的熔点显著高于 Ti-25V-15Cr 熔池固液界面温度 (Ti-25V-15Cr 液相线温度为 1514 °C, Cr 的熔点是 1857 °C, V 的熔点是 1890 °C),因而熔池固液界面前沿存在 V、Cr 粉末颗粒的不熔区,使得进入该区域未熔的 Cr、V 粉末无法进一步充分熔化,可作为“冷源”或者异质形核的质点,诱发等轴晶粒的形核和生长。图6是未熔粉末进入熔池液固界面前沿时的形核机制示意图。

以上解释了采用粘结包覆 Ti(150 μm)+V(15 μm)+Cr(15 μm)为原料,获得的熔覆层凝固组织主要由等轴晶或者类等轴晶组成的原因。和直接混合 Ti(150 μm)+V(15 μm)+Cr(15 μm)相比,直接混合 Ti(150 μm)+V(100 μm)+Cr(150 μm)时,所获得的沉积层凝固组织形态和粘结包覆 Ti(150 μm)+V(15 μm)+Cr(15 μm)为原料时相似,这是由于大尺寸的 V(100 μm)、Cr(150 μm)

颗粒具有较快的运动速度，能够快速突破熔池固液界面，且粉末熔化时间较长，因而能够进入局部熔池固液界面前沿区域，同时由于 V、Cr 的高熔点特性，部分 V、Cr 粉末由于进入不熔区而未充分熔化，导致等轴晶粒的形核和生长。

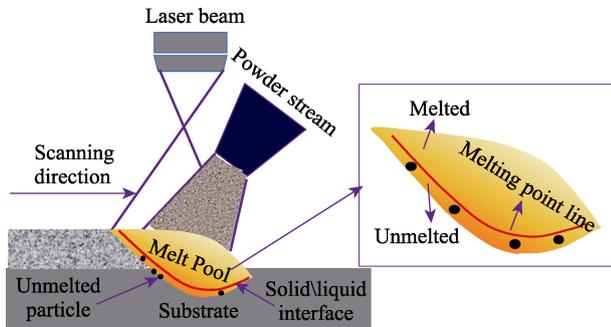


图 6 未熔粉末进入熔池液固界面前沿时的形核机制  
Fig.6 Nucleation mechanism of unmelted powder entering the front edge of the liquid-solid interface of the molten pool

在激光熔覆沉积过程中，熔池大小以及进入熔池的粉末数量是决定沉积效率的主要影响因素。只有进入熔池并经历熔化、凝固的粉末才可以形成熔覆层。当熔池尺寸、形态相同时，粉末的发散程度以及粉末颗粒与熔池气液界面、固液界面的交互作用，决定了激光熔覆的沉积效率。粉末为粘结包覆 Ti(150 μm)+V(15 μm)+Cr(15 μm) 以及直接混合 Ti(150 μm)+V(100 μm)+Cr(150 μm)，在沉积过程中，惰性气体所

运载的粉末的粒径约为 100~150 μm，在相同的送粉条件下，粉末的运动速度及粉末流发散程度基本一致。此外，粉末颗粒突破气液界面进入熔池后的运动状态也基本一致，因而相同激光熔覆沉积工艺及送粉工艺条件下，采用两种混合粉末为原料时，激光熔覆沉积效率基本一致，且沉积试样的宽度、高度无显著差异。然而，当采用直接混合 Ti(150 μm)+V(15 μm)+Cr(15 μm) 为原料时，由于 Cr 粉颗粒和 V 粉颗粒的尺寸较小，仅为 0~15 μm，基于赵汉宇等<sup>[15]</sup>的研究，小尺寸的非球形 V、Cr 颗粒在与熔池气液界面交互作用过程中，难于突破熔池气液界面，且不易被熔池固液界面反弹，因而在激光熔覆沉积过程中，沉积层表面容易粘粉，进而影响基体（已形成的熔覆层）对激光能量的吸收。如图 7 所示，以直接混合 Ti(150 μm)+V(15 μm)+Cr(15 μm) 作为原料时，激光熔覆沉积 Ti-25V-15Cr 合金试样的最后一层熔覆层的顶部区域存在多个尺寸相对较小的未熔颗粒，未熔颗粒与熔覆层形成冶金结合，但并未进入熔覆层内部。熔覆层顶部未熔颗粒的 EDS 能谱面扫描成分分析结果表明，未熔颗粒为 V 粉，与前述理论分析结果相一致，表明沉积层顶部未熔颗粒的形成主要是高熔点的 V 粉和 Cr 粉。

结合上述分析以及根据合金对能量输入的吸收率（式 1，其中， $r$  为合金电阻率， $\lambda$  为激光器波长），

$$\beta = 0.365 \sqrt{\frac{\gamma}{\lambda}} - 0.0067 \frac{\gamma}{\lambda} + 0.006 \left( \frac{\gamma}{\lambda} \right)^2 \quad (1)$$

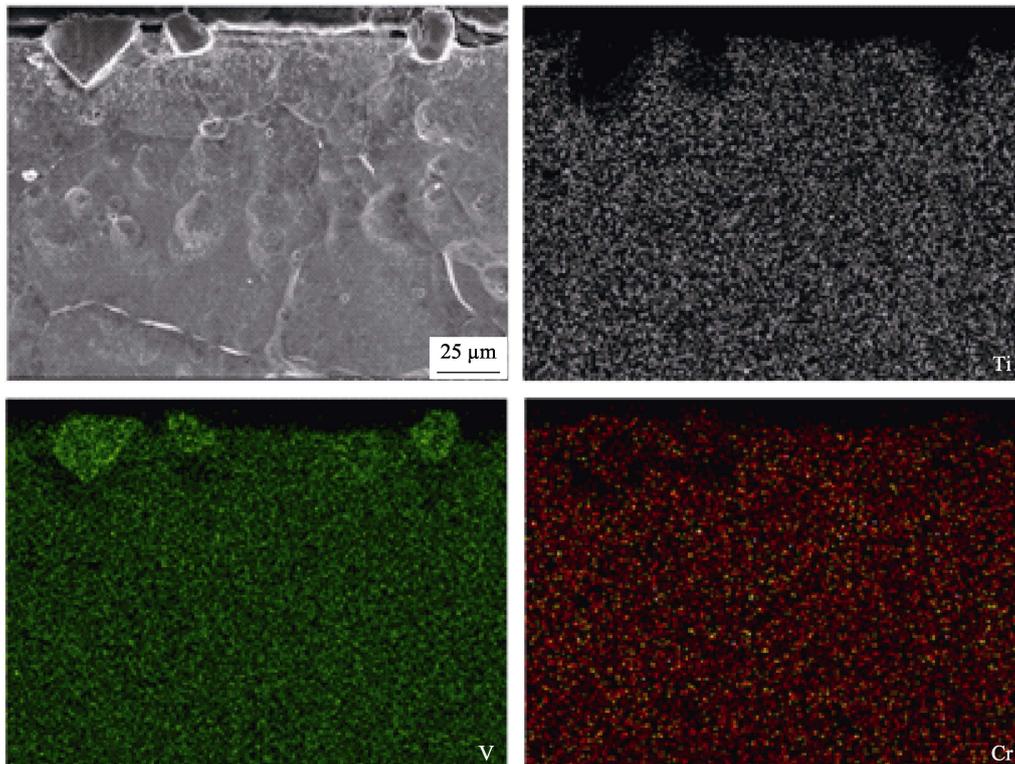


图 7 EDS 能谱面扫描成分分析  
Fig.7 EDS component analysis

采用 JMat-Pro 热力学计算软件计算获得, 在相同温度下, Ti-25V-15Cr 合金的电阻率显著高于纯 V 和纯 Cr (例如, 在 1600 °C 时, Ti-25V-15Cr 合金的电阻率为 0.575  $\mu\Omega/\text{m}$ , 而 V 的电阻率为 0.365  $\mu\Omega/\text{m}$ , Cr 的电阻率为 0.246  $\mu\Omega/\text{m}$ ), 因而, 当沉积层表面形成 V、Cr 粘粉时, 将导致基体 (已形成的熔覆层) 对激光吸收率显著降低, 相同工艺条件下, 熔池尺寸较采用粘结包覆 Ti(150  $\mu\text{m}$ )+V(15  $\mu\text{m}$ )+Cr(15  $\mu\text{m}$ ) 和直接混合 Ti(150  $\mu\text{m}$ )+V(100  $\mu\text{m}$ )+Cr(150  $\mu\text{m}$ ) 时显著减小, 因而显著降低了沉积效率, 导致沉积试样的沉积高度显著降低。值得注意的是, 尽管基于以上分析认为, 当采用直接混合 Ti(150  $\mu\text{m}$ )+V(15  $\mu\text{m}$ )+Cr(15  $\mu\text{m}$ ) 为原料时, V、Cr 元素不易于突破气液界面并形成表面粘粉, 但是这并不会影响整个沉积试样的成分均匀性, 因为在沉积下一层时, 将对上一层的熔覆层进行重熔, 这使得沉积每一层时, 上一层重熔进入熔池的 V、Cr 元素, 补偿了表面粘粉导致的 V、Cr 元素损失, 进而保证了沉积试样成分的均匀性和一致性。此外, 由于 V、Cr 粘粉的存在, 根据材料对激光能量吸收的特性, 使得形成的熔池向两边铺展, 从而使沉积试样宽度略有增加, 但由于沉积层高度显著降低, 所以直接混合 Ti(150  $\mu\text{m}$ )+V(15  $\mu\text{m}$ )+Cr(15  $\mu\text{m}$ ) 为原料时, 激光熔覆沉积 Ti-25V-15Cr 合金的沉积效率仍显著降低。

## 4 结论

1) 以粘结包覆 Ti(150  $\mu\text{m}$ )+V(15  $\mu\text{m}$ )+Cr(15  $\mu\text{m}$ ) 和直接混合 Ti(150  $\mu\text{m}$ )+V(100  $\mu\text{m}$ )+Cr(150  $\mu\text{m}$ ) 粉末为原料激光熔覆沉积时, 由于局部未熔颗粒的异质形核作用, 使得激光熔覆沉积 Ti-25V-15Cr 合金组织由等轴晶或类等轴晶组成; 以直接混合 Ti(150  $\mu\text{m}$ )+V(15  $\mu\text{m}$ )+Cr(15  $\mu\text{m}$ ) 为原料时, 不存在显著的高熔点颗粒的异质形核作用, 因而 Ti-25V-15Cr 合金主要由外延生长的柱状晶组成。

2) 粘结包覆 Ti(150  $\mu\text{m}$ )+V(15  $\mu\text{m}$ )+Cr(15  $\mu\text{m}$ ) 和直接混合 Ti(150  $\mu\text{m}$ )+V(100  $\mu\text{m}$ )+Cr(150  $\mu\text{m}$ ) 的粉末材料, 粉末的运动状态基本一致, 使得激光熔覆沉积 Ti-25V-15Cr 试样的沉积效率基本相同。以直接混合 Ti(150  $\mu\text{m}$ )+V(15  $\mu\text{m}$ )+Cr(15  $\mu\text{m}$ ) 为原料时, 由于小尺寸的 V、Cr 粉末颗粒在沉积层表面形成粘粉, 降低了材料对激光的吸收率, 减小了激光束在材料表面形成的熔池尺寸, 因而相应的激光熔覆沉积 Ti-25V-15Cr 合金的沉积高度降低。

### 参考文献:

- [1] 黄卫东, 林鑫, 陈静, 等. 激光立体成形[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2007.
- [2] 王华明. 高性能金属构件增材制造技术-开启国防制造新篇章[J]. 国防制造技术, 2013(3): 5-7.
- [3] SUN S D, LIU Q C, BRANDT M, et al. Effect of laser clad repair on the fatigue behaviour of ultra-high strength AISI4340 steel[J]. Materials science and engineering: A, 2014, 606: 46-57.
- [4] 林鑫, 薛蕾, 陈静, 等. 钛合金零件的激光成形修复[J]. 航空制造技术, 2010, (8): 55-58.
- [5] LIN Xin, XUE Lei, CHEN Jing, et al. Laser forming repair of titanium alloy parts[J]. Aviation manufacturing technology, 2010(8): 55-58.
- [6] ZHANG C L, YAO C M, WANG C D. Modulations of nonideal repaired damage sites irradiated by CO<sub>2</sub> laser at different parameters[J]. Optik-international journal for light and electron optics, 2016, 127(8): 3750-3754.
- [7] 张凤英, 刘桐, 胡广, 等. 激光熔覆沉积 Ti-20V-15Cr 合金的组织演化与硬度[J]. 应用激光, 2017, 37(1): 1-6.
- [8] ZHANG Feng-ying, LIU Tong, HU Guang, et al. Microstructure evolution and hardness of laser cladding deposited Ti-20V-15Cr alloy[J]. Journal of applied lasers, 2017, 37(1): 1-6.
- [9] AZIZI H, ZUROB H, BOSE B, et al. Additive manufacturing of a novel Ti-Al-V-Fe alloy using selective laser melting[J]. Additive manufacturing, 2018, 21: 529-535.
- [10] BANERJEE R, BHATTACHARYYA D, COLLINS P C, et al. Precipitation of grain boundary  $\alpha$  in a laser deposited compositionally graded Ti-8Al-V alloy an orientation microscopy study[J]. Acta materialia, 2004, 52(2): 377-385.
- [11] BANERJEE R, COLLINS P C, BHATTACHARYYA D, et al. Microstructural evolution in laser deposited compositionally graded  $\alpha/\beta$  titanium-vanadium alloys[J]. Acta materialia, 2003, 51(11): 3277-3292.
- [12] SIMONELLI M, ABOULKHAIR N T, COHEN P, et al. A comparison of Ti-6Al-4V in-situ alloying in selective laser melting using simply-mixed and satellited powder blend feedstocks[J]. Materials characterization, 2018, 143: 118-126.
- [13] DUTTA B, FROES F H. The additive manufacturing of titanium alloys[J]. Advanced materials research, 2017, 72(2): 96-106.
- [14] LIU W Y, LIN Y H, CHEN Y H, et al. Effect of different heat treatments on microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V titanium alloy[J]. Rare metal materials and engineering, 2017, 46(3): 634-639.
- [15] GASPER A N D, CATCHPOLE S, CLARE A T. In-situ synthesis of titanium aluminides by direct metal deposition[J]. Journal of materials processing technology, 2017, 239: 230-239.
- [16] 林鑫, 李延民, 王猛, 等. 合金凝固列状晶/等轴晶转变[J]. 中国科学: 技术科学, 2003, 33(7): 577.
- [17] LIN Xin, LI Yan-min, WANG Meng, et al. Solidification columnar crystal/equal crystal transformation of alloy[J]. Chinese science: technical science, 2003, 33(7): 577.
- [18] 赵汉字. 激光立体成形过程中粉末与熔池气液界面微观作用机制[D]. 西安: 长安大学, 2017.
- [19] ZHAO Han-yu. Microscopic mechanism of gasliquid interface between powder and molten pool during laser stereofforming[D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.