

# 激光增材制造纯钨及钨铜复合材料的组织与性能

邓澄<sup>1</sup> 蒋梦龙<sup>1</sup> 周圣丰<sup>2,3</sup>

(1.华南理工大学机械与汽车工程学院; 2.暨南大学先进耐磨蚀及功能材料研究院;  
3.华中科技大学武汉光电国家研究中心)

**摘要** 采用激光增材制造技术制备了纯钨及钨铜复合材料,通过光学显微镜、扫描电镜和维氏硬度测量仪等表征了其表面形貌、微观结构和硬度,系统分析了粉末特性、激光功率、扫描速率以及铺粉厚度等参数对纯钨制件的组织形貌和力学性能的影响,以及对钨铜复合材料界面结合的影响。通过优化激光功率和扫描速率等加工参数,制备了致密度最高达 97.66%,硬度(HV)高达 486.23 的纯钨制件,以及界面结合良好的钨铜复合材料制件。

**关键词** 激光增材制造;纯钨;钨铜复合材料;微观组织;性能

中图分类号 TB333.1<sup>+</sup>2;TG249.9

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.07.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Microstructure and Properties of Pure Tungsten and Tungsten Copper Composites by Laser Additive Manufacturing

Deng Cheng<sup>1</sup>, Jiang Menglong<sup>1</sup>, Zhou Shengfeng<sup>2,3</sup>

(1.School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology;

2.Institute of Advanced Wear & Corrosion Resistance and Functional Materials, Jinan University;

3.Wuhan National Laboratory for Optoelectronics (WNLO), Huazhong University of Science and Technology.)

**Abstract:** Pure tungsten and tungsten copper composites were fabricated by laser additive manufacturing. The surface morphology, microstructure and hardness were characterized by optical microscopy, scanning electron microscope and Vickers hardness tester. The influence of parameters, including powder characteristics, laser power, scanning speed and layer thickness on the microstructure and mechanical properties of pure tungsten parts, as well as the interface bonding of tungsten copper composites were systematically analyzed. Pure tungsten parts with relative density up to 97.66% and hardness up to 486.23 HV were produced, and tungsten copper composites with desirable interface bonding were obtained by optimizing the processing parameters.

**Key Words:** Laser Additive Manufacturing, Pure Tungsten, Tungsten Copper Composites, Microstructure, Properties

钨及其合金具有高熔点、高密度、低热膨胀系数、高强度、高硬度等特性,在航空航天、电子、化工、核工业及其他极端环境领域具有重要应用<sup>[1~6]</sup>。钨铜复合材料

是由高熔点、高硬度的钨和高导电、高热导率的铜所构成的假合金,具有良好的耐电弧侵蚀性、抗熔焊性、高强度和高硬度等特性,被广泛地用作电触头材料,电阻焊、

收稿日期:2022-03-07

基金项目:广东省基础与应用基础研究基金资助项目(2020A151110699);国家自然科学基金重大研究计划资助项目(92166112);华中科技大学武汉光电国家研究中心开放基金资助项目(2021WNLKF010);桂林电子科技大学广西信息材料重点实验室开放基金资助项目(211003-K);国家金属材料近净成形工程技术研究中心、金属材料高效近净成形技术与装备教育部重点实验室(B类)开放基金资助项目(2020003)

第一作者简介:邓澄,男,1986年出生,博士研究生,广州(510640),E-mail:dengcheng@scut.edu.cn

通信作者:周圣丰,男,1977年出生,教授,广州(510632),E-mail:zhousf1228@163.com

引用格式:邓澄,蒋梦龙,周圣丰.激光增材制造纯钨及钨铜复合材料的组织与性能[J].特种铸造及有色合金,2022,42(7):804-809.

DENG C, JIANG M L, ZHOU S F. Microstructure and properties of pure tungsten and tungsten copper composites by laser additive manufacturing[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(7):804-809.

[10] XIONG C, MA Y C, CHEN B, et al. Modeling of filling and solidification process for TiAl exhaust valves[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2013, 26(1): 33-48.

[11] LU D A. Thermophysical properties necessary for advanced casting simulation[J]. International Journal of Thermophysics, 2002, 29(5): 1 131-1 146.

[12] 胡海涛,张熹雯,朱春雷,等.铸造 TiAl 合金凝固组织的截面尺寸效应[J].稀有金属,2017,41(7):751-758.

[13] 苏彦庆,郭景杰,贾均,等. TiAl 基合金涡轮熔模型壳离心精密铸造[J].稀有金属材料与工程,2002,31(4):295-298.

(编辑:刘晨辉)

电火花加工和等离子电极材料,电热合金、高密度合金以及特殊用途军工材料等<sup>[7~11]</sup>。

纯钨的熔点高达 3 422 ℃,生产技术难度大。目前,纯钨产品的制备工艺主要包括铸造、粉末冶金和机加工等。然而纯钨的熔铸过程耗能严重、成本较高,尤其是在制备具有复杂外形和大尺寸产品时致密度低,且存在较大的残余应力<sup>[2,3]</sup>。粉末冶金法是将钨粉装入型腔内,在加压的同时对粉末进行加热烧结,但是制备的常规烧结态钨产品存在密度低、强度低、塑性差和杂质含量难以控制等缺点,产品性能差,应用范围受限<sup>[4,5]</sup>。钨具有良好的射线吸收能力,因而热核反应堆装置常采用带有复杂内部散热结构的全钨偏滤器模块<sup>[6]</sup>,但传统的机加工工艺难以真正解决上述技术难题。

钨与铜的熔点相差很大,且不互溶。目前,钨铜复合材料的制备工艺主要有熔渗法和粉末冶金法等。高维娜等<sup>[8]</sup>采用高温烧结钨骨架后渗铜工艺制备了钨铜复合靶材,其相对密度最高值为 96.9%,硬度(HV)为 257;刘彬彬等<sup>[9]</sup>在制造 W/Cu20 复合材料时,通过优化固态热压法工艺参数获得了结合良好的试样,使铜以网状结构分布在钨颗粒周围;任俊鹏等<sup>[10]</sup>以钨丝和铜丝为原料,通过液态熔渗铜的方法制备了低铜含量的钨渗铜复合材料。但是,普遍存在致密度较低、钨铜结合情况较差的问题,并且随着产品形状复杂程度增加,工艺实施困难程度也大幅上升,且成形过程中存在晶粒的异常生长,使最终产品力学性能下降<sup>[11]</sup>。因此,针对难熔金属钨以及材料性能不匹配的钨铜复合材料,采用新的成形技术非常必要。

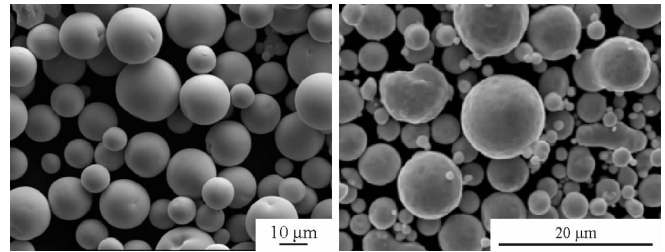
增材制造技术是一种基于“离散-堆积”原理,通过逐层增材的方式将数字模型加工成三维实体物件的手段<sup>[12,13]</sup>。其中激光选区熔化技术(Selective laser melting, SLM)采用激光作为能量源,其聚焦后的高能量密度可熔化甚至气化现有的金属,成形精度高,成形件的性能好,在实现对难熔金属的材料、结构与性能的一体化调控方面具有优势。

本课题采用激光选区熔化技术制备了高纯钨及钨铜复合材料,通过光学显微镜、带能谱仪的扫描电镜和维氏硬度测量仪等表征了不同激光加工参数下纯钨的表面形貌、微观结构和力学性能及钨铜复合材料的界面结合,系统分析了粉末形状、粒径、成分等材料参数以及激光功率、扫描速率、扫描间隔、铺粉厚度等工艺参数对纯钨的表面形貌、微观组织、硬度,以及钨铜复合材料界面结合性能的影响,以期改进工艺措施、提高纯钨成形致密度和力学性能,以及高性能钨铜复合材料的制备提供参考。

## 1 试验材料、设备与方法

### 1.1 试验材料

图 1 为纯钨和锡青铜的原始粉体。所用的纯钨粉体为球形粉体(见图 1a),纯度大于 99.9%,其余微量杂质元素含量均小于 0.001%,粒径分布  $D_{10}$ 、 $D_{50}$ 、 $D_{90}$  分别为 7.937、13.663、22.788  $\mu\text{m}$ (Mastersizer 2000 激光粒度仪),粉体的松装密度为 10.81  $\text{g}/\text{cm}^3$ ,粉末流动性为 10.50  $\text{s}/(50 \text{g})$ 。所用的铜合金粉体为水雾化法制备的 QSn 6.5-0.1 锡青铜合金球形粉体(见图 1b),平均粒径为 20  $\mu\text{m}$ 。QSn 6.5-0.1 锡青铜合金粉体的化学成分见表 1。



(a) 纯钨 (b) 锡青铜

图 1 原始粉体的 SEM 照片

Fig.1 SEM micrographs of pure W and QSn6.5-0.1 copper powders

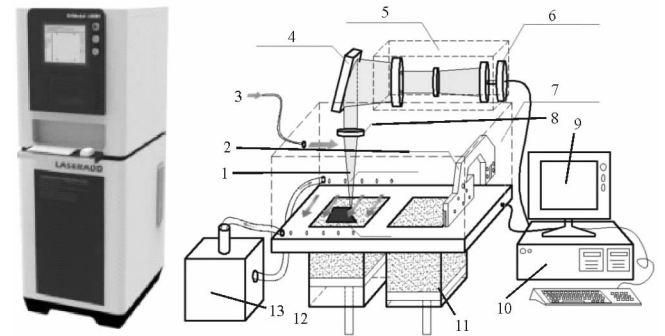
表 1 锡青铜粉体的化学成分

**Tab.1 Chemical composition of tin bronze copper powder %**

$\omega_B$						
Sn	P	Zn	Fe	Ni	其他微量元素	Cu
6.74	0.12	0.17	0.02	0.1	0.08	余量

### 1.2 试验设备

采用 Dimetal-100H 型 SLM 加工设备,其原理见图 2。设备的核心组件部分包括连续光纤激光器、光路



(a) 实物图 (b) 原理图

图 2 Dimetal-100H 成形设备实物及原理图

Fig.2 Object and mechanism diagram of Dimetal-100H equipment

- 1.激光束 2.铺粉刷 3.保护气 4.扫描振镜 5.光学系统
- 6.准直器 7.成形腔 8.聚焦透镜 9.控制系统 10.激光器
- 11.粉料缸 12.成形缸 13.气体循环系统

传输与控制单元、水循环冷却系统、密封成形室、烟尘过滤系统、铺粉机构、粉料缸与成形缸控制系统、扫描控制软件等。粉末储存于粉料缸中,成形基板放置于成形缸内,成形开始前将成形腔内充满氩气作为保护气体。激光器通过准直器、扫描振镜和聚焦透镜输出激光束。每一层的成形开始之前,成形缸下降,粉料缸上升,铺粉刷将粉末从粉料缸表面刮到成形缸表面,激光束按照预定路径扫描,使路径上的粉末熔化并快速凝结。表2为Dimetal-100H的主要工艺参数。

表2 Dimetal-100H的工艺参数

Tab.2 Process parameters for Dimetal-100H

激光器类型	激光器波长/nm	光束质量因子	聚焦光斑直径/ $\mu\text{m}$	保护气体	铺粉层厚/mm	加工速度/ $(\text{cm}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	最大成形尺寸/mm
500 W 光纤激光器(SPI)	1070	$\leq 1.1$	60~80	氩气	0.02~0.1	20~50	100×100×120

### 1.3 试验方法

不同成形工艺参数下输入的激光能量密度对纯钨以及钨铜复合材料成形件组织和性能影响很大。输入的激光体积能量密度  $E_v$  可表征为:

$$E_v = P/(vdw) \quad (1)$$

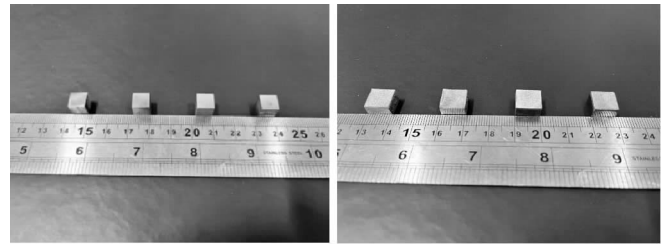
式中,  $P$  为激光功率;  $v$  为扫描速度;  $d$  为扫描间距;  $w$  为铺粉厚度。合适的激光能量密度输入对高致密的纯钨试样制备至关重要,基于前期的研究<sup>[14~16]</sup>,设计了固定 25  $\mu\text{m}$  的铺粉厚度,以及4组不同的激光功率和扫描速率工艺参数进行试验,打印了4个单层表面积尺寸为 10 mm×10 mm 的试样( $W_1$ 、 $W_2$ 、 $W_3$ 、 $W_4$ ),成形层数为400层。在制备钨铜复合材料时,也设计4组不同的激光功率和扫描速率工艺参数进行试验,但考虑到钨铜复合材料的材料性能匹配不高、润湿性差等特点,采用几乎相同的激光体积能量密度输入条件来进行对比研究,在成形200层的纯钨基体上铺锡青铜粉末,继续成形50层打印了4个单层表面积尺寸为 10 mm×10 mm 的钨铜复合材料方形试样( $W_{Cu1}$ 、 $W_{Cu2}$ 、 $W_{Cu3}$ 、 $W_{Cu4}$ ),着重研究激光热累积效应对钨铜复合材料界面结合的影响情况。各成形试样的打印参数见表3。

表3 各试样打印参数

Tab.3 Print parameters for each specimen

试样	$P/W$	$v/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	$d/\text{mm}$	$w/\text{mm}$	$E_v/(\text{J} \cdot \text{mm}^{-3})$
$W_1$	360	600	0.06	0.025	400
$W_2$	360	400	0.06	0.025	600
$W_3$	320	500	0.06	0.025	426.67
$W_4$	260	400	0.06	0.025	433.33
$W_{Cu1}$	160	250	0.08	0.03	266.67
$W_{Cu2}$	160	300	0.08	0.03	222.22
$W_{Cu3}$	180	338	0.08	0.03	221.89
$W_{Cu4}$	200	376	0.08	0.03	221.63

图3为最终制备的成形试样照片。



(a) 纯钨 (b) 钨铜复合材料  
图3 不同打印参数下制备的试样

Fig.3 Photos of specimens prepared by different print parameters

根据阿基米德排水法测定纯钨成形试样的致密度,纯钨试样的质量使用精度为 0.001 g 的 BS224S 电子天平,纯钨成形件的致密度使用实际测得的纯钨制件密度与标准纯钨密度相对值的百分比来表示。对纯钨及钨铜复合材料成形件进行研磨、抛光,并对钨铜复合材料选用配比为 3.5 g 的  $\text{FeCl}_3$ +25 mL 的  $\text{HCl}$ +75 mL 的  $\text{H}_2\text{O}$  的腐蚀液进行腐蚀,腐蚀时间为 30 s,使用 LEICA DM4000M 倒置金相显微镜和配置 EDS 能谱分析仪的 NOVA NANOSEM 430 型扫描电镜对合金形貌和微观组织进行分析;使用自动转塔显微硬度计(HV-1000Z)测定纯钨成形件的维氏硬度。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 激光增材制造纯钨试样

#### 2.1.1 纯钨试样的表面形貌与微观组织

图4为未经抛光打磨处理的不同成形工艺参数下制备的纯钨试样上表面和侧表面形貌。可以看出,所有参数下钨粉熔化、凝固后的上表面形貌类似,呈现出大面积的光亮熔道区域,说明采用显微镜观察时聚焦面一致,表面相对平整,品质相对较高,见图4a~图4d。此外,大多数熔道与熔道之间搭接情况较好,说明熔池处于相对稳定状态,熔化、润湿和凝固过程平稳进行。但是,激光选区熔化成形纯钨试样上表面的整体光滑程度远不如成形性能较好的钛等金属,这主要归因于纯钨材料的固有物理性能影响,如自由电子密度大,电导率高达  $1.79 \times 10^7 \text{ S/m}$  (293 K),熔点高达 3 422  $^\circ\text{C}$ ,对连续红外激光存在强烈的反射效应,且具有较高的粘度。激光选区熔化成形纯钨试样时,熔滴不稳定,来不及完成铺展而快速凝固球化,层间结合性也相对较差,导致成形件存在非连续组织和孔洞等缺陷。图4e~图4h为其侧面的形貌,可以观察到层间的微裂纹以及由于熔滴未很好铺展反而汇聚成的大颗粒球,进一步证实了上述结果分析。值得注意的是, $W_1$ 、 $W_3$  和  $W_4$  试样均呈现出连续直线熔道,而  $W_2$  试样呈现出非连续的熔道,可能

归因于  $W_2$  试样成形输入的激光能量密度较大, 马兰戈尼效应更剧烈, 增强了保护气流对熔池的拉拽, 以及高功率激光低扫描速率下形成大的热影响区和温度梯度,

热应力大, 导致了非连续组织以及孔隙等缺陷的形成, 破坏了成形面的一致性, 呈现出熔道被割裂成多个小分段的形貌。

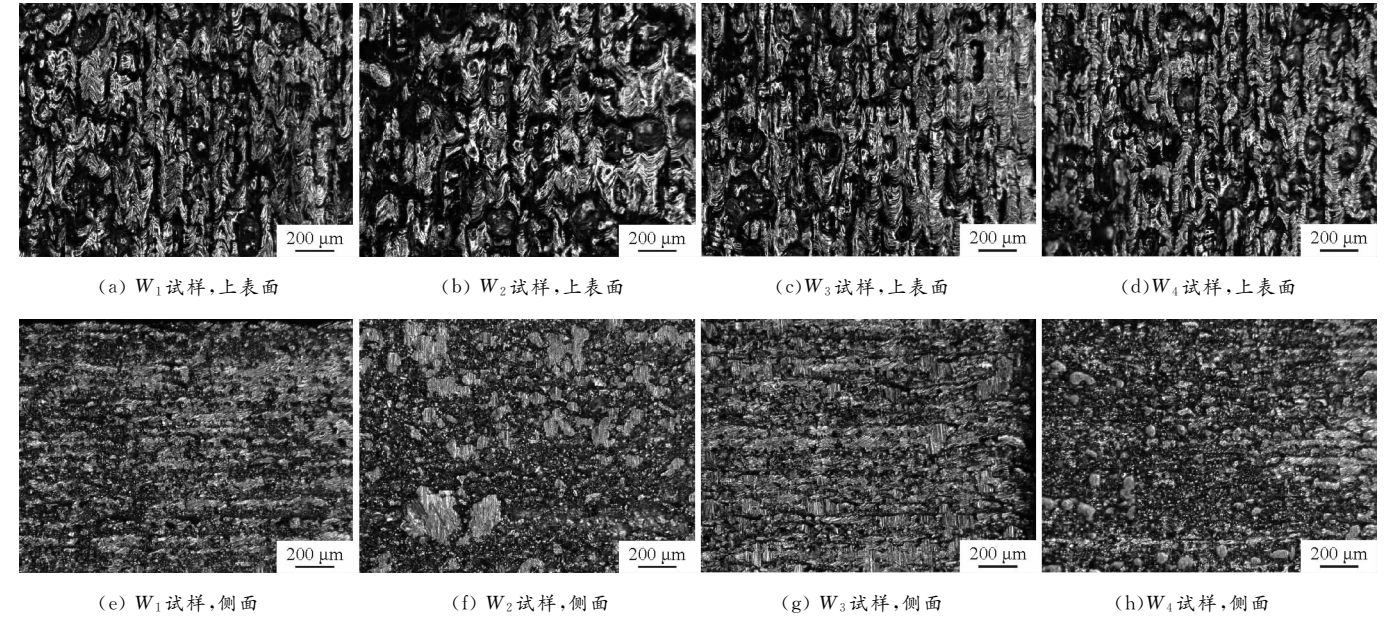


图 4 纯钨试样的上表面和侧面形貌

Fig.4 Top and side surface morphologies of pure tungsten specimens

图 5 为  $W_1$  试样的微观组织和能谱面扫描分布结果。可以看出, 其整体组织紧密, 但存在少量的微裂纹 (见图 5a), 以及未熔化的粉末颗粒和孔洞缺陷 (见图 5b)。TAN C L 等<sup>[14]</sup> 认为激光成形纯钨试样时, 受制于材料的固有物理性能, 这些微裂纹缺陷的出现是无法

完全避免的。通过对  $W_1$  试样的能谱面扫描分布结果进行分析, 可以发现成分分布均匀, 无团聚偏析, 但检测到少量的 C, 这可能是因为保护气氛中混入空气, 以及钨粉原存的微量碳杂质, 激光熔化过程中其聚焦后的高能量密度可能促使微量引入的 C 与 W 发生合金化反应,

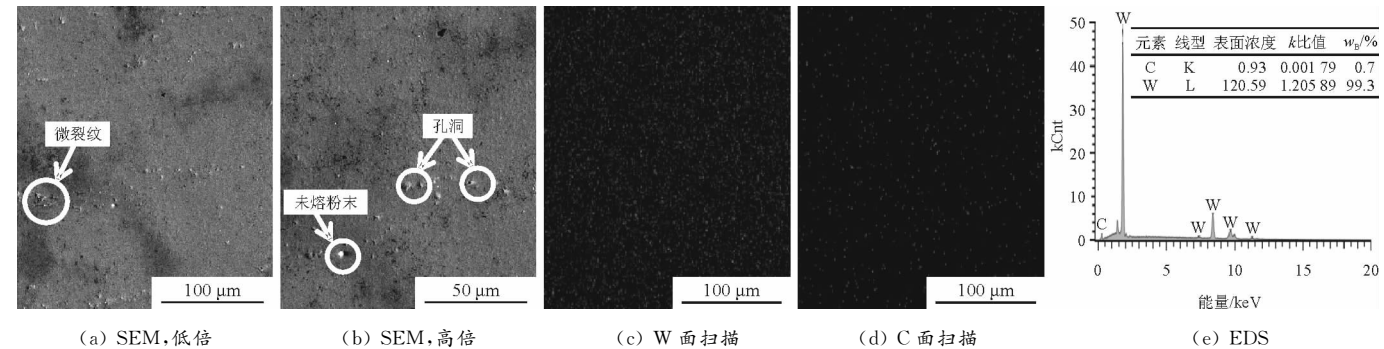


图 5 纯钨试样  $W_1$  的 SEM 照片及能谱面扫描结果

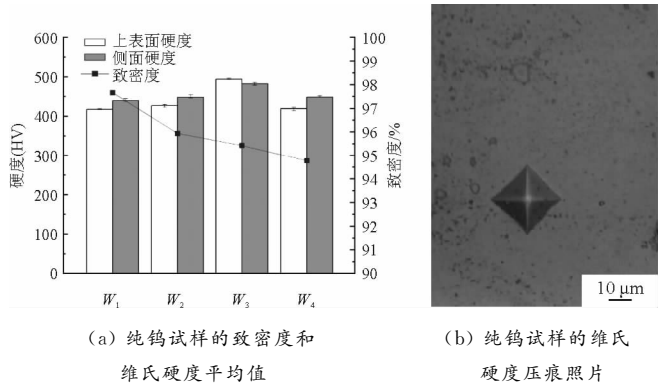
Fig.5 SEM images and EDS surface scanning results of pure tungsten specimen  $W_1$

最终以碳化钨的形式存在于组织中。

### 2.1.2 纯钨试样的致密度和硬度

图 6 为纯钨试样的致密度和维氏硬度及其压痕照片。从图 6a 可以看出,  $W_1$  试样的致密度达 97.66%,  $W_4$  试样的致密度接近 95%, 远高于 ZHOU X 等<sup>[15]</sup> 和 DEPRez K 等<sup>[16]</sup> 等报道的 SLM 成形纯钨制件致密度 (分别为 82.9% 和 89.92%)。所有成形工艺参数下制备的试样其硬度(HV)均在 420 以上, 比传统粉末冶金法制备的纯钨试样硬度值<sup>[17]</sup> (一般为 320~400) 要高。这

是因为激光选区熔化成形制备的纯钨试样组织更致密, 通过快速熔化凝固使晶粒更细化, 并形成高位错密度和残余应力, 上述强化效应极大提高了试样的硬度。值得注意的是, 试样  $W_3$  和  $W_4$  的致密度比试样  $W_1$  和  $W_2$  要低, 但是其硬度却并没有降低, 可能是激光熔化过程中引入了微量的碳与钨发生化学反应, 形成了高硬度的碳化钨, 硬质相的存在会导致试样表面整体硬度提高。此外, 试样  $W_1$ 、 $W_2$  和  $W_4$  的侧面硬度略高于其上表面的硬度, 可能归因于激光增材制造过程中激光会对层间界面结合处进行多次的加热重熔, 导致侧面的组织结构比仅



(a) 纯钨试样的致密度和维氏硬度平均值  
图6 纯钨试样的致密度和维氏硬度及其压痕照片  
Fig.6 Densification and Vickers hardness as well as indentation photo of pure tungsten specimens

受激光熔化的上表面组织结构更致密,而  $W_3$  试样的侧面硬度略低于其上表面的硬度,一个可能的解释是在激光聚焦后的高能量密度诱导下,  $W_3$  试样的上表面组织中形成的碳化钨硬质相含量相对较多,使得其上表面的硬度值更高。

2.2 激光增材制造钨铜复合材料

图7为钨铜复合材料界面结合处的形貌。可以看出,试样  $W_{Cu1}$ 、 $W_{Cu2}$  和  $W_{Cu3}$  均在界面结合处发生了严重的翘曲变形(见图7a~图7c),导致了界面剥离。试样  $W_{Cu4}$  的界面结合情况良好(见图7d),这主要归因于往复的激光熔化作用会造成区域性大的热累积、热影响区和温度梯度,钨和锡青铜热物性差异巨大,钨的导

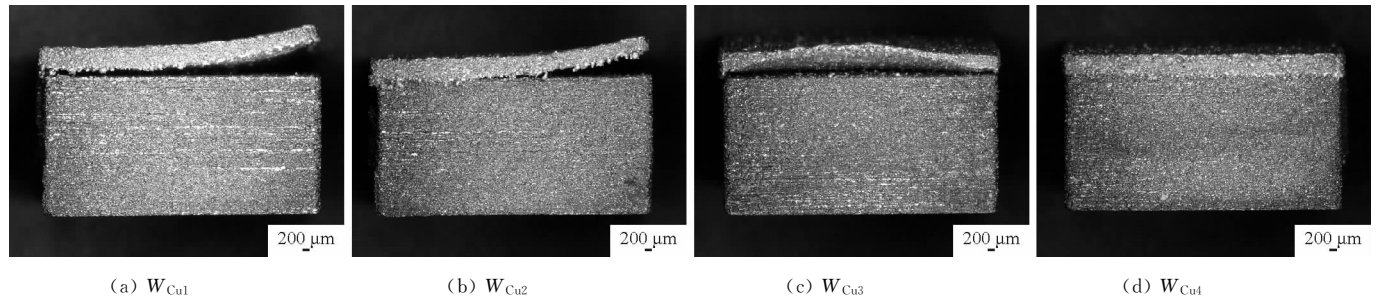


图7 钨铜复合材料的界面结合形貌

Fig.7 Interface bonding morphologies of W/Cu composites

热、传热和热膨胀系数等均远小于锡青铜,界面结合处的锡青铜与纯钨冷凝收缩不一致,热应力过大,导致产生严重的翘曲变形,而试样  $W_{Cu4}$  成形时的扫描速率相对较高,热累积效应相对较小,故而界面结合相对较好。另外,钨与铜不能实现真正的冶金结合,因为钨铜复合材料之间的润湿性较差。虽然锡青铜中含有少量的低熔点 Sn,但是由于 Sn 含量偏低,且在 Cu 中的扩散速度很慢,故而很难通过 Sn 成分扩散迁移形成理想的中间过渡层来有效改善钨铜复合材料的界面结合性能。钨铜复合材料之间的热膨胀系数不匹配,不能实现冶金结合且润湿性不好,界面结合性能较差,在纯钨基体上打印大尺寸多层累加的锡青铜材料时,往复激光熔化累积作用会产生大的热累积效应,容易导致界面结合处的开

裂和变形。尽管存在上述问题,但是试样  $W_{Cu4}$  良好的界面结合表明在利用激光选区熔化技术成形复杂几何形状、个性化和定制化的钨铜复合材料微型件方面极具优势,在微电子等领域有着广阔的潜在应用前景。

图8为界面结合良好的  $W_{Cu4}$  成形试样的微观组织及能谱面扫描分布结果。可以发现,在靠近纯钨基体的区域呈现出细晶组织,而在远离纯钨基体的区域呈现出柱状晶组织。这主要是因为钨的导热和传热性能远低于锡青铜合金,成形过程中会产生大的温度梯度。在靠近纯钨基体界面处形成激冷区域,造成锡青铜快速熔体凝固时在靠近钨铜界面处的激冷区形成无规则的细晶组织区,而在远离纯钨基体的区域形成柱状晶区。通过对  $W_{Cu4}$  成形试样的能谱面扫描分布结果进行分析,发

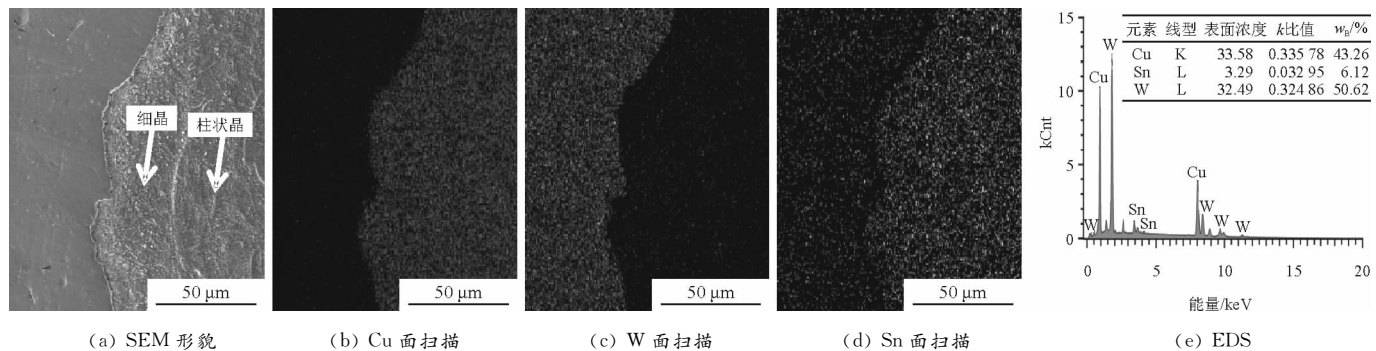


图8 钨铜复合材料  $W_{Cu4}$  试样的 SEM 照片及能谱面扫描结果

Fig.8 SEM images and EDS results of tungsten copper composites  $W_{Cu4}$  specimen

现虽然有少量的 Sn 从锡青铜合金中往纯钨基体的迁移扩散,但由于 Sn 含量不高,且扩散较慢,无法形成理想的中间过渡层来有效增强钨铜复合材料的界面结合性能。

### 3 结 论

(1)激光增材制造纯钨制件时,小粒径的高流动性球形态粉末、薄的铺粉厚度以及合适的激光体积能量密度输入等有助于钨熔滴的铺展,能够减缓球化和孔隙等成形缺陷,致密组织,提高致密度和力学性能。此外,由于原始钨粉及成形氛围中残存的微量碳元素,激光熔化过程中其聚焦后的高能量密度促进了 C 与 W 的化学反应形成碳化钨硬质相,有助于提高合金的硬度。

(2)激光增材制造钨铜复合材料时,钨铜复合材料本身的材料性能失配对其界面结合的影响很大,钨铜的热物性差异以及只能以假合金的结构形式存在严重损害了其界面结合性能。但是通过优化扫描速率和激光功率等加工参数降低成形过程中的热累积效应,减缓温度梯度和热应力等因素的负面影响,能够有效改善钨铜的界面结合开裂和翘曲变形缺陷,实现高性能钨铜复合材料微型结构件的制备。

#### 参 考 文 献

[1] 武媛洁,徐英鸽,郑敏杰,等. 高比重钨合金的研究现状与发展趋势[J]. 热加工工艺, 2015, 44(20): 11-13.

[2] WEN S F, WANG C, ZHOU Y, et al. High-density tungsten fabricated by selective laser melting: Densification, microstructure, mechanical and thermal performance[J]. Optics and Laser Technology, 2019, 116: 128-138.

[3] 杨广宇,汤慧萍,刘楠,等. 增材制造技术制备钨材料研究进展[J]. 热加工工艺, 2016, 45(24): 16-18.

[4] 马运柱,黄伯云,刘文胜. 钨基合金材料的研究现状及其发展趋势[J]. 粉末冶金工业, 2005(5): 46-54.

[5] 吴泽卫,徐英鸽,李明. 高密度钨合金的研究现状[J]. 热加工工艺, 2014, 43(12): 5-7.

[6] PINTSUK G. Tungsten as a plasma-facing material[J]. Comprehensive Nuclear Materials, 2012, 4: 551-581.

[7] 许磊. 微波加热金属铜粉及熔渗烧结钨铜复合材料特性研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2016.

[8] 高维娜,王庆相,杨怡,等. 靶材用钨铜复合材料的制备工艺[J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39(5): 892-895.

[9] 刘彬彬,陈江华,谢建新. 粒度配比法制备近全致密 W/Cu20 复合材料[J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39(1): 17-21.

[10] 任俊鹏,王毓,赵君,等. 钨渗铜复合材料致密化机理研究[J]. 稀有金属与硬质合金, 2020, 48(4): 17-23.

[11] DAI H, GU D D. Thermal behavior and densification mechanism during selective laser melting of copper matrix composites: Simulation and experiments[J]. Materials and Design, 2014, 55: 482-491.

[12] NGO T D, KASHANI A, IMBALZANO G, et al. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges[J]. Composites, 2018, B143: 172-196.

[13] CALIGNANO F, MANFREDI D, AMBROSIO E P, et al. Overview on additive manufacturing technologies[J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(4): 593-612.

[14] TAN C L, ZHOU K, MA W, et al. Selective laser melting of high-performance pure tungsten: Parameter design, densification behavior and mechanical properties[J]. Science and Technology of Advanced Materials, 2018, 19(1): 370-380.

[15] ZHOU X, LIU X, ZHANG D, et al. Balling phenomena in selective laser melted tungsten[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 222: 33-42.

[16] DEPREZ K, VANDENBERGHE S, VAN A K, et al. Rapid additive manufacturing of MR compatible multipinhole collimators with selective laser melting of tungsten powder[J]. Medical Physics, 2013, 40: 012 501.

[17] LIU G Y, NI S, SONG M. Effect of indentation size and grain/sub-grain size on microhardness of high purity tungsten[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(10): 3 240-3 246.

(编辑:彭瑾)

### 探索有实用价值的新型合金

历史经验证明,一种新的合金研发是一个成本较高、效率较低且耗时较长的试错过程。研发通常需要通过开展一系列试验,对材料进行熔化、测试,以调试其性能,研究新的合金成分,并确定成形的热处理程序,尝试在现有合金的基础上增强材料的各项性能。

大约 20 年前,集成计算材料工程(ICME)的研发问世,标志着研发试验从物理实验转向了虚拟模拟实验方向。这种方法,可以有效地加快关键应用领域的多种含镍合金的研发速度。

Questek Innovations 公司通过集成计算材料工程,开发出了几种性能增强的含镍合金。其中,该公司研发的高强度、耐腐蚀的含镍钢——Ferrium S53,是一种超高强度钢,可应用于航空航天结构制造等领域。该合金在力学性能方面提高了耐大气腐蚀的优势,无需使用镉涂层。

Ferrium S53 是第一个采用集成计算材料工程研发的新型合金,并获得了航空航天材料规范(AMS)和金属材料特性开发和标准化(MMPDS)资格,成为生产美国空军 T-38 训练机上起落架的材料。

该公司开发的另一个产品——含镍钢 Ferrium C64,是一种高性能齿轮钢的替代品。这种材料具有超高强度和断裂韧性,具有优秀的抗疲劳性及耐热性,可应用于关键航空航天领域和汽车领域,如旋翼飞机和赛车传动齿轮等。

(摘自中国有色金属报)