

激光立体成形 Ti-Al-V 系的合金力学性能

张凤英¹ 谭 华² 陈 静² 林 鑫²

(¹长安大学材料科学与工程学院, 陕西 西安 710064
²西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘要 研究了以元素粉末为送进原料时,激光立体成形(LSF)Ti-Al-V 系合金的力学性能。结合激光立体成形 Ti- x Al- y V($x \leq 10, y \leq 25$)合金的硬度测试分析和人工神经网络模型优化,获得激光立体成形 Ti- x Al- y V 合金成分-硬度的关系。选择典型成分合金进行室温拉伸性能测试,在此基础上获得激光立体成形钛合金抗拉强度与显微硬度的比例因子 K 值为 2.86~3.00,可实现对激光立体成形 Ti- x Al- y V($x \leq 10, y \leq 25$)合金的抗拉强度预测。另外,室温拉伸性能测试结果表明,激光立体成形 Ti-4Al-3V、Ti-5Al-3V、Ti-4Al-4V、Ti-5Al-4V 以及 Ti-3Al-6V 沉积态的综合室温拉伸性能均达到 Ti-6Al-4V 合金的锻件标准。

关键词 材料;激光立体成形;钛合金;粉末;力学性能

中图分类号 TG146.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0603004

Mechanical Properties of Laser Solid Formed Ti-Al-V Ternary System Titanium Alloys

Zhang Fengying¹ Tan Hua² Chen Jing² Lin Xin²

(¹ School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China
² State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China)

Abstract The mechanical properties of laser solid forming (LSF) of Ti-Al-V ternary system titanium alloys from blended elemental powders are investigated. The relationship between the composition and the hardness of LSF Ti- x Al- y V($x \leq 10, y \leq 25$) is obtained based on the hardness test and the neural network model optimization. The room temperature tensile properties of some typical LSF Ti- x Al- y V alloys are obtained, and the scale factor K of the tensile strength to the microhardness is obtained between 2.86 to 3.00, and thus the tensile strength prediction for LSF Ti- x Al- y V can be realized. The test results show that the room temperature tensile properties of laser deposited Ti-4Al-3V, Ti-5Al-3V, Ti-4Al-4V, Ti-5Al-4V and Ti-3Al-6V have reached the wrought standard of Ti-6Al-4V.

Key words materials; laser solid forming; titanium alloy; powder; mechanical property

OCIS codes 140.3590; 140.3390; 160.2120

1 引 言

钛合金具有比强度高、热强性好、耐腐蚀等优点,近年来已发展成为先进飞机和高推比发动机的主要金属结构材料。飞机的钛合金关键零件通常采用形状复杂的整体带筋加强结构,对于这类零件的生产我国普遍采用的是自由锻而后数控机加的制造方法,存在材料利用率低、研制周期长、制造成本高

等问题,因此,迫切需要发展新的更为先进的钛合金近净成形技术。

激光立体成形(LSF)技术是 20 世纪 90 年代中期迅速发展起来的一项新的先进制造技术,能够实现高性能复杂结构致密金属零件的自由立体成形以及受损零件的修复^[1]。激光立体成形钛合金因具有无模制造、研制周期短、加工速度快等一系列的技术

收稿日期: 2012-03-16; 收到修改稿日期: 2012-05-02

基金项目: 国家自然科学基金(51105311)、中国博士后科学基金特别资助项目(201104679)和西北工业大学凝固技术国家重点实验室开放课题(SKLS201102)资助课题。

作者简介: 张凤英(1980—),女,讲师,主要从事激光加工方面的研究。E-mail: zhangfengying@chd.edu.cn

优势而受到国内外研究者的广泛关注和青睐^[2~7]。另外,由于激光立体成形采用同步送粉、逐点逐层熔覆沉积的成形方式,因此可以将构成合金的各元素粉末,或中间合金粉末混合送入激光熔池,在运动的激光熔池中进行合金化,进而通过多层激光熔覆,实现合金材料的制备。这使得合金成分的柔性化设计成为可能,同时也为新型合金设计、多元合金的合金化机理研究提供可行的技术途径。俄亥俄州立大学的 Collins 等^[8~13]针对钛合金体系,较为系统地开展了以混合元素粉末为原料的激光立体成形技术研究,其中包括混合熔对 Timetal 21S (Ti-15Mo-2.7Nb-3Al-0.2Si)沉积层冶金质量的影响,激光立体成形 Ti-xV、Ti-xMo、Ti-xTa 以及 Ti-8Al-xV ($0 \leq x \leq 25$)合金成分梯度试样的成分、组织及相分布特征,激光立体成形 Ti-Nb-Zr-Ta 系钛合金的成分-组织-性能的关系以及不同热处理制度下激光立体成形 Ti-xAl-yV ($2 < x < 8, 2 < y < 6$)合金成分-组织-性能的关系等。

各类钛合金中,Ti-6Al-4V 合金是目前发展和应用最为成熟的钛合金。然而,前期研究表明,激光立体成形 Ti-6Al-4V 沉积态凝固组织为外延生长的粗大柱状晶,原始 β 晶内的微观组织为极少量针状 α 加大量细长的魏氏 α 板条,无论在相的形态还是尺寸上都不同于传统钛合金的四种典型组织特征;溶质原子 Al、V 在 Ti 中的固溶度增大,形成过饱和固溶体,固溶强化作用增强,同时激光立体成形的快热、快冷过程使得沉积试样微区存在拉伸应力应变,以上因素的综合作用使得激光立体成形 Ti-6Al-4V 沉积态组织一般呈现出高强度低塑的力学特性^[14,15]。可见,目前使用的材料成分不一定能够充分发挥激光立体成形加工工艺的优势。结合激光立体成形技术的工艺过程特点,对现有合金成分进行改进,发展激光立体成形专用钛合金粉末也是激光立体成形钛合金技术的一个重要研究方向。

作者前期针对广泛应用于航空、航天、汽车领域中的 Ti-Al-V 系合金激光立体成形沉积态的微观组织演化展开了研究^[16,17],揭示了激光立体成形 Ti-xAl-yV 合金的凝固组织及微观相结构演化机理。基于前期研究基础,本文针对激光立体成形 Ti-xAl-yV 合金的力学性能展开研究。

2 实验过程及方法

2.1 研究方法

由于硬度实验是力学性能实验中最简单的实验

方法,且金属材料的硬度与强度之间近似地成正比关系^[18],因此,为了获得激光立体成形 Ti-xAl-yV 合金成分与强度的关系,针对以下内容展开研究:

1) 首先对沉积试样的硬度进行测试,结合人工神经网络模型优化获得激光立体成形 Ti-xAl-yV 合金成分-硬度的关系;

2) 选择典型成分的合金进行室温拉伸性能测试,在考察部分激光立体成形 Ti-xAl-yV 合金综合室温拉伸性能的同时,能够进一步获得激光立体成形钛合金抗拉强度 σ_b 与硬度之间的近似比例 K ,从而可根据 Ti-xAl-yV 合金的硬度预测结果对其抗拉强度及其他性能数据进行评估。

2.2 实 验

研究是在西北工业大学凝固技术国家重点实验室建立的激光立体成形系统上完成的,该系统由 RS-850 型 5 kW CO₂ 激光器、LPM-408 四轴三联动数控工作台、GTV PF2/2 型送粉器、同轴送粉喷嘴和惰性气氛加工室等组成。

实验原料:纯 Ti、纯 Al、纯 V 粉末,粉末性质如表 1 所示。将 Ti、Al、V 元素粉末按预设比例配置,经真空烘干处理后,装入充干燥氩气的混料罐里,并在球磨机上机械混合 2 h 后装入送粉器,在纯钛基材上进行激光立体成形工艺实验制备沉积试样。沉积试样分为两类,一类为单道薄板试样,尺寸为 100 mm×10 mm×3 mm,经线切割、研磨、抛光后在 HX-1000 型显微硬度计上进行显微硬度测试,加载载荷为 200 g,加载时间为 15 s;另一类为块状试样,尺寸为 80 mm×16 mm×16 mm[如图 1(a)所示],经线切割和表面磨光制成标准棒状拉伸试样[尺寸如图 1(b)所示],在 INSTRON11-96 电子拉力实验机上进行室温拉伸性能测试。实验用激光立体成形工艺参数如表 2 所示。基材为冷轧纯钛板,实验前用砂纸打磨基材表面以去除氧化层,并用丙酮清洗。

表 1 实验用粉末材料性质

Table 1 Characteristics of raw material powders

Material of the powders	Appearance	Particle size /mesh	Oxygen mass fraction /%
Ti	Spherical	-100~200	0.069
Al	Sphere like	-150~200	0.090
V	Irregular	-200~250	0.071

3 结果与讨论

3.1 激光立体成形 Ti-xAl-yV 合金硬度分析

建立激光立体成形 Ti-Al-V 系合金的成分-硬

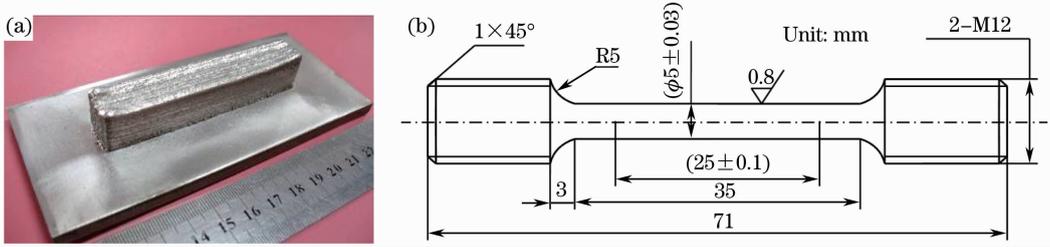


图 1 激光立体成形钛合金室温拉伸性能试样：(a) LSF 试样照片；(b) 拉伸试样尺寸
Fig.1 Room-temperature tensile samples of LSF titanium alloys. (a) Photo of LSF sample;
(b) shape and size of tensile bar

表 2 激光立体成形工艺参数

Table 2 Parameters of the laser solid forming process

Laser power /W	Scanning velocity /(mm/s)	Spot diameter /mm	Powder feed rate /(g/min)	Carrier gas flow /(L/h)	ΔZ /mm
1850	5	3.0	4.5	180	0.4

度之间关系的三层 BP 神经网络模型,其结构如图 2 所示,其中输入层的两个神经元节点分别为 Al 和 V,输出层神经元节点为激光沉积试样的显微硬度 h_{HV} ,隐含层神经元节点数目由“试错法”确定为 5。

对比,结果如表 3 所示。从中可以看出,神经网络模型预测结果与实验结果得到了很好的吻合,显微硬度预测值与实测值之间的平均相对误差仅为 4%~5%,采用该神经网络模型可以较为准确地实现激光立体成形 $Ti-xAl-yV$ 合金熔覆层显微硬度预测。

表 3 激光立体成形 $Ti-xAl-yV$ 合金检验样本数据的网络预测值与实验测量值

Table 3 Network output results and measured results of the microhardness of LSF $Ti-xAl-yV$

Number	Al mass fraction / %	V mass fraction / %	h_{HV} (data from experiment)	h_{yHV} (data obtained by network prediction)
1#	2.4	1.4	256.0	257.0
2#	2.9	5.8	331.3	329.5
3#	3.2	2.1	274.0	278.5
4#	3.8	4.0	318.2	315.0
5#	4.1	1.5	293.9	290.0
6#	4.5	3.3	323.0	320.3
7#	5.0	4.0	335.7	337.6
8#	5.1	6.3	380.2	375.8
9#	6.02	3.81	356.1	375.5
10#	7.2	4.9	402.5	398.0
11#	8.2	4.85	391.0	414.0
12#	10.6	8.3	518.0	522.0
13#	11.00	6.67	479.7	484.4

图 3 显示了基于 Matlab 获得的神经网络模型的训练结果,即激光立体成形 $Ti-xAl-yV$ 合金成分-显微硬度的关系。从图 3 可以看出,在 Al 的质量分数小于或等于 10%,V 的质量分数小于或等于 10%的情况下,随着 Al、V 含量的增加,激光立体成形 $Ti-xAl-yV$ 合金的显微硬度近似呈线性增加趋

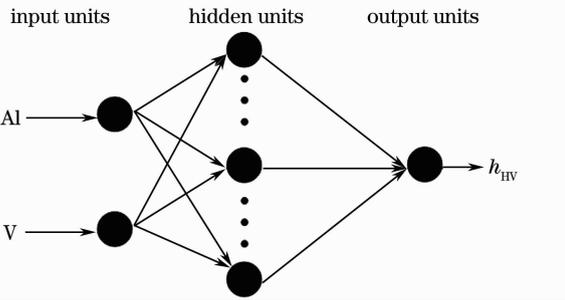


图 2 3 层神经网络模型结构图

Fig.2 A three-layer feedforward neural network structure

如前所述,采用 HX-1000 型显微硬度计对不同成分的合金试样进行显微硬度测试,采用多点求平均值的方法,最终共获得 60 组不同成分的合金试样的显微硬度,将获取的 60 组数据进行归一化处理。

$$x' = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, \quad (1)$$

式中 x 为单个样本值, x_{\max} 和 x_{\min} 分别为样本的最大值与最小值, x' 为归一化后的数据。

归一化处理后,将 60 组数据分为 2 组,其中 47 组作为训练样本,13 组作为检验样本。将训练样本数据中的 Al 质量分数、V 质量分数和沉积试样显微硬度值分别作为输入、输出数据读入网络进行训练,选取常用的 S 型函数作为节点作用函数。模型训练误差要求小于 0.003。

将检验样本中的 13 组数据与模型训练结果进行

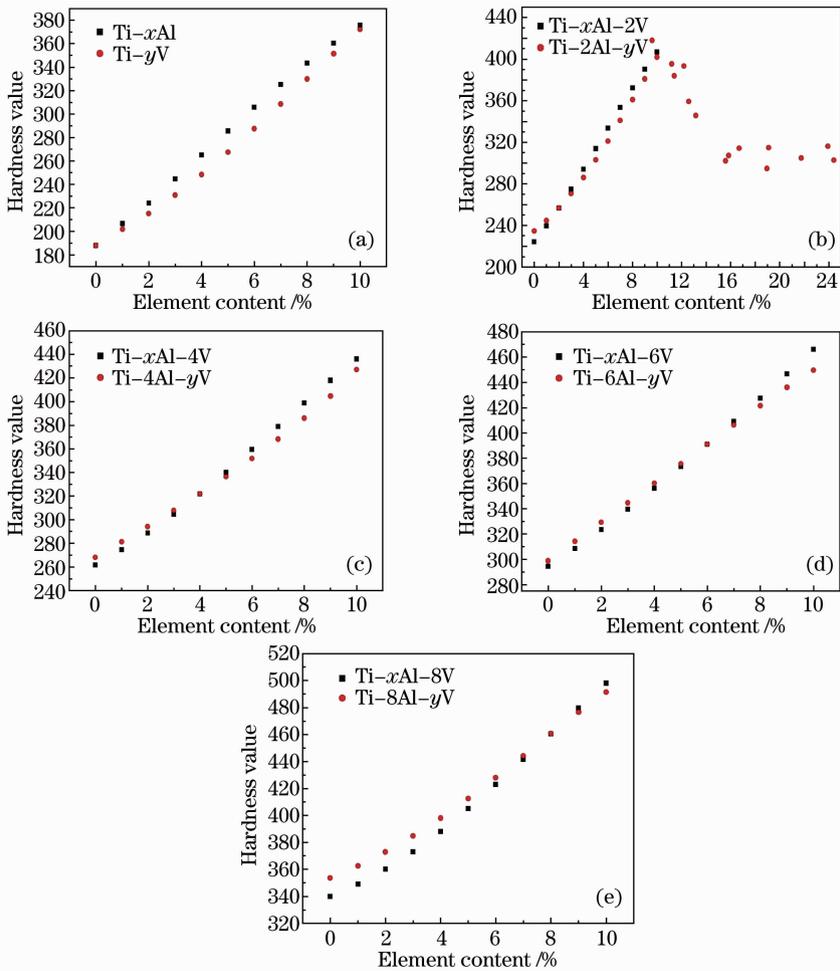


图 3 Ti-xAl-yV 合金沉积态成分-硬度的关系

Fig. 3 Hardness versus composition of as-deposited Ti-xAl-yV alloys

势。另外,由图 3(b)可以看出,随着 V 的质量分数由 0 增加至约 10%,Ti-2Al-yV 合金的显微硬度值由 220 增加至约 420,而随着 V 含量继续增加,显微硬度值开始有所下降,当 V 的质量分数达到 15% 时,硬度值降低至约 300,且随着 V 含量的继续增加基本保持恒定,其波动范围为 300~320。这表明当 V 的质量分数达到 15% 时,激光沉积试样中已保留了单相 β 组织,因而随着 V 含量的继续增加合金熔覆层的显微硬度值基本保持恒定。图 4 显示了 Ti-2Al-16V 合金熔覆层的显微组织特征。可以看出,合金熔覆层的凝固组织为单相 β 等轴晶粒形态。相关研究表明,当 β 稳定元素含量达到临界浓度 C_k 时,较快冷却能够使得合金中的 β 相保持到室温。V 元素的临界质量分数约为 15%^[19],与本研究的实验结果相吻合。这说明,当 V 含量达到其临界浓度时,即使激光立体成形制备单道薄板试样时要经历多次再热循环过程,但仍足以使得合金中的 β 相保留至室温。



图 4 激光立体成形 Ti-2Al-16V 的显微组织

Fig. 4 Microstructure of LSF Ti-2Al-16V alloy

3.2 激光立体成形 Ti-xAl-yV 合金室温拉伸性能

选择典型成分激光立体成形 Ti-xAl-yV 合金沿光束扫描方向进行室温拉伸性能测试,每组分制备三个试样进行测试,并对离散性较小的测试数据取平均值。表 4 显示了部分合金的室温拉伸性能的测试结果及显微硬度的预测值,并求得激光立体成形试样抗拉强度和显微硬度预测值的比值 K 值(表 4 中 8# 和 11# 试样未测断面收缩率 ψ 值,并在

表 4 中以“/”表示)。从表 4 中可以看出, K 值范围为 2.86~3.00, 由此获得:

$$\sigma_b \approx (2.86 \sim 3.00) \times h_{HV}, \quad (2)$$

(2)式即为激光立体成形钛合金的抗拉强度与显微

硬度之间的近似关系表达式, 利用(2)式, 结合激光立体成形 Ti- x Al- y V 合金显微硬度预测结果, 即可实现激光立体成形 Ti- x Al- y V 合金抗拉强度近似值的预测。

表 4 LSF Ti- x Al- y V 合金力学性能Table 4 Mechanical properties of LSF Ti- x Al- y V alloys

Number	Composition	Oxygen mass fraction	K	h_{yHV}	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%	ψ /%
		of powder /%						
1#	Al: 2.4; V: 1.4	0.07	2.88	257.0	740	665	18.0	53.0
2#	Al: 4.1; V: 1.5	0.07	2.90	290.0	840	770	15.0	43.5
3#	Al: 3.2; V: 2.1	0.07	3.01	278.5	840	780	18.0	55.0
4#	Al: 4.3; V: 2.8	0.07	3.00	308.9	930	845	14.0	43.0
5#	Al: 4.5; V: 3.3	0.07	2.93	320.3	940	885	9.0	39.0
6#	Al: 4.9; V: 3.2	0.07	2.97	327.7	975	880	11.0	28.0
7#	Al: 3.8; V: 4.0	0.07	2.86	315.0	900	830	13.5	42.0
8#	Al: 5.0; V: 4.0	0.07	2.87	337.6	970	895	13.0	/
9#	Al: 2.9; V: 5.8	0.07	2.93	329.5	965	885	13.5	40.0
10#	Al: 5.1; V: 6.3	0.07	2.93	375.8	1100	1030	7.3	18.0
11#	Al: 7.2; V: 4.9	0.07	2.89	398.0	1150	1070	8.5	/
12#	Ti-6Al-4V	0.20	2.94	/	1200	1140	6.0	18.5
Ti-6Al-4V wrought standard (ASTM-B381-05)					≥ 895	≥ 828	≥ 8.0	≥ 25.0

需要指出的是, 研究中原材料 Ti 粉末氧的质量分数约 0.07% (如表 1 所示), 对激光立体成形 Ti- x Al- y V 合金的氧含量进行测试, 结果表明激光立体成形 Ti- x Al- y V 合金沉积态的氧质量分数约为 0.11%, 由于钛合金中的氧含量对沉积试样的力学性能有显著影响, 因此图 3 中沉积试样的显微硬度预测值仅适用于氧质量分数约 0.11% 的激光沉积 Ti- x Al- y V 合金。为了考虑氧含量对沉积试样抗拉强度的影响, 对(2)式进行修正, 以实现针对不同氧含量激光沉积钛合金试样的抗拉强度预测。相关研究表明, 钛合金中氧的质量分数每增加 0.05%, 沉积试样的抗拉强度将增加 60 MPa 左右。因此, 对于不同氧含量的激光立体成形 Ti- x Al- y V 合金抗拉强度的预测, 可采用公式

$$\sigma_b \approx (2.86 \sim 3.00) \times h_{yHV} + \frac{(W_{OS} - 0.11) \times 60}{0.05} \quad (3)$$

进行修订。式中 h_{yHV} 为氧的质量分数为 0.11% 的激光立体成形 Ti- x Al- y V 合金硬度预测值, W_{OS} 为激光立体成形 Ti- x Al- y V 合金氧含量。

如果激光立体成形钛合金过程中的成形气氛得到很好的控制, 且忽略 Al、V 粉末中氧含量对最终的激光沉积试样氧含量的影响, 则(2)式还可以修正为

$$\sigma_b \approx (2.86 \sim 3.00) \times h_{yHV} + \frac{(W_{OP} - 0.07) \times 60}{0.05}, \quad (4)$$

式中 W_{OP} 为原材料 Ti 粉末氧含量。

采用(3)、(4)式即可对不同氧含量的激光立体成形 Ti- x Al- y V 合金的抗拉强度进行预测。例如: 氧的质量分数为 0.20% 的 Ti-6Al-4V 预合金粉末为原料, 沉积试样抗拉强度预测值为 1182~1236 MPa, 对比表 4 中 Ti-6Al-4V 沉积态室温拉伸性能的实测值可以发现, 实测数据在预测值范围之内, 表明(2)~(4)式可以较为准确地估算激光立体成形 Ti- x Al- y V 合金的抗拉强度区间。另外, 对于其他钛合金, 可以首先通过硬度实验获得激光立体成形钛合金的显微硬度, 进而采用(2)式对其抗拉强度进行预测。

另外, 从表 4 中典型成分激光立体成形 Ti- x Al- y V 合金的室温拉伸性能测试结果还可以看出, 和锻造退火态相比, 预合金粉末为原料的激光立体成形 Ti-6Al-4V 合金沉积态的抗拉强度比锻造退火态标准高 300 MPa 左右, 而延伸率显著低于锻造退火态。与之相比, 元素粉末为原料的激光立体成形 Ti-4Al-3V(4#、5#)、Ti-5Al-3V(6#)、Ti-4Al-4V(7#)、Ti-5Al-4V(8#) 以及 Ti-3Al-6V(9#) 的综合室温拉伸性能得到明显改善, 均超过锻件标准, 其

抗拉强度值在 900~1000 MPa 之间,与锻件相当,同时保证了非常好的塑性。图 5 所示为 Ti-5Al-3V、Ti-4Al-4V 和 Ti-3Al-6V 的拉断宏观形貌,可以判断,试样在断裂过程中产生了较大的颈缩,塑性较好。图 6 对比了 Ti-6Al-4V 和 Ti-3Al-6V 合金沉积态拉伸断口的 SEM 形貌,可以看出,Ti-6Al-4V 和 Ti-3Al-6V 的断口形貌均呈现典型的韧窝特征,属于韧性断裂,但相对而言,Ti-6Al-4V 断口韧窝小而浅,而 Ti-3Al-6V 断口韧窝大而且深,从断口形貌也可判断 Ti-3Al-6V 沉积态的塑性显著优于预合金粉末

为原料获得的激光立体成形 Ti-6Al-4V 合金。

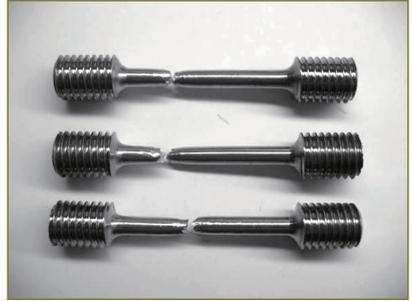


图 5 LSF Ti-xAl-yV 合金拉断宏观形貌
Fig. 5 Photos of LSF Ti-xAl-yV alloy tensile bars

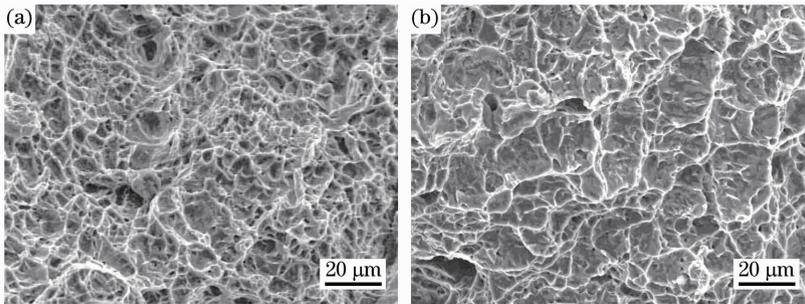


图 6 LSF Ti-6Al-4V (a)和 Ti-3Al-6V (b)的 SEM 断口形貌
Fig. 6 SEM analysis of fracture surface of as-deposited (a) Ti-6Al-4V and (b) Ti-3Al-6V

4 结 论

以 Ti、Al、V 元素粉末为原料激光立体成形 Ti-xAl-yV 合金,针对激光立体成形 Ti-xAl-yV 合金的力学性能展开研究,并获得以下研究成果:

1) 基于激光立体成形 Ti-xAl-yV ($x \leq 10, y \leq 25$)合金的显微硬度测试分析,建立了激光立体成形 Ti-xAl-yV 合金显微硬度预测的神经网络模型,模型预测结果与实验测量结果得到了很好的吻合,获得了激光立体成形 Ti-xAl-yV 合金成分-硬度的关系;

2) 结合典型成分合金的室温拉伸性能测试,获得了激光立体成形钛合金抗拉强度、显微硬度的比例因子 K 值为 2.86~3.00;基于氧含量对合金力学性能的影响以及激光立体成形 Ti-xAl-yV 合金成分-硬度的关系,实现了激光立体成形 Ti-xAl-yV ($x \leq 10, y \leq 25$)合金的抗拉强度预测;

3) 典型成分合金力学性能测试结果表明,激光立体成形 Ti-4Al-3V、Ti-5Al-3V、Ti-4Al-4V、Ti-5Al-4V 以及 Ti-3Al-6V 沉积态的综合室温拉伸性能均达到 Ti-6Al-4V 合金的锻件标准。

参 考 文 献

1 Huang Weidong, Lin Xin, Chen Jing *et al.*. Laser Solid Forming

Technology[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2007. 1~20, 113

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,2007.1~20,113

2 A. Suárez, M. J. Tobar, A. Yáñez *et al.*. Modeling of phase transformations of Ti6Al4V during laser metal deposition[J]. *Physics Procedia*, 2011, **12**(A): 666~673

3 A. Crespo, R. Vilar. Finite element analysis of the rapid manufacturing of Ti-6Al-4V parts by laser powder deposition[J]. *Scripta Materialia*, 2010, **63**(1): 140~143

4 X. J. Tian, S. Q. Zhang, A. Li *et al.*. Effect of annealing temperature on the notch impact toughness of a laser melting deposited titanium alloy Ti-4Al-1.5Mn[J]. *Mater. Sci. Engng. A*, 2010, **527**(7-8): 1821~1827

5 Wang Junwei, Chen Jing, Liu Yanhong *et al.*. Research on microstructure of TC17 titanium alloy fabricated by laser solid forming[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 847~851

王俊伟,陈静,刘彦红等.激光立体成形 TC17 钛合金组织研究[J].中国激光,2010,**37**(3): 847~851

6 Zhang Yongzhong, Huang Can, Wu Fuyao *et al.*. Microstructure and properties of laser direct deposited TA12 titanium alloy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(12): 3215~3219

张永忠,黄灿,吴复尧等.激光熔化沉积 TA12 钛合金的组织及性能[J].中国激光,2009,**36**(12): 3215~3219

7 Zhu Juanfang, Gao Bo, Wang Zhongyi *et al.*. Properties of pure titanium for dental implants fabricated by rapid laser forming[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(4): 588~592

朱娟芳,高勃,王忠义等.用于牙科植入体的激光快速成形纯钛性能研究[J].中国激光,2007,**34**(4): 588~592

8 P. C. Collins, R. Banerjee, H. L. Fraser. The influence of the enthalpy of mixing during the laser deposition of complex titanium alloys using elemental blends[J]. *Scripta Materialia*, 2003, **48**(10): 1445~1450

- 9 R. Banerjee, D. Bhattacharyya, P. C. Collins *et al.*. Precipitation of grain boundary α in a laser deposited compositionally graded Ti-8Al- x V alloy-an orientation microscopy study[J]. *Acta Materialia*, 2004, **52**(2): 377~385
- 10 P. C. Collins, R. Banerjee, S. Banerjee *et al.*. Laser deposition of compositionally graded titanium-vanadium and titanium-molybdenum alloys[J]. *Mater. Sci. Engng. A*, 2003, **352**(1-2): 118~128
- 11 R. Banerjee, P. C. Collins, D. Bhattacharyya *et al.*. Microstructural evolution in laser deposited compositionally graded α/β titanium-vanadium alloys[J]. *Acta Materialia*, 2003, **51**(11): 3277~3292
- 12 S. Nag, R. Banerjee, H. L. Fraser. A novel combinatorial approach for understanding microstructural evolution and its relationship to mechanical properties in metallic biomaterials[J]. *Acta Biomaterialia*, 2007, **3**(3): 369~376
- 13 P. C. Collins. A Combinatorial Approach to the Development of Composition-Microstructure-Property Relationship in Titanium Alloys Using Directed Laser Deposition[D]. Columbus: Ohio State University, 2004. 63~151
- 14 Xue Lei, Chen Jing, Lin Xin *et al.*. Microstructures and mechanical properties of laser rapid repaired Ti-6Al-4V alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2007, **36**(6): 989~993
薛蕾, 陈静, 林鑫等. 激光快速修复 Ti-6Al-4V 合金的显微组织与力学性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, **36**(6): 989~993
- 15 Zhang Shuangyin, Lin Xin, Chen Jing *et al.*. Influence of heat treatment on the microstructure and properties of Ti-6Al-4V titanium alloy by laser rapid forming[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2007, **36**(7): 1263~1266
张霜银, 林鑫, 陈静等. 热处理对激光成形 TC4 合金组织及性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, **36**(7): 1263~1266
- 16 Hua Tan, Fengying Zhang, Jing Chen *et al.*. Microstructure evolution of laser solid forming of Ti-Al-V ternary system alloys from blended elemental powders[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2011, **9**(5): 051403
- 17 Tan Hua, Zhang Fengying, Chen Jing *et al.*. Research on microstructure evolution of laser solid forming of Ti- x Al- y V alloys from blended elemental powders[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2011, **40**(8): 1372~1376
谭华, 张凤英, 陈静等. 混合元素法激光立体成形 Ti- x Al- y V 合金的微观组织演化[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, **40**(8): 1372~1376
- 18 Xu Zili. Engineering Material [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2003. 7~9
徐自立. 工程材料[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2003. 7~9
- 19 Zhang Baochang. The Nonferrous Metals and the Heat Treatment of the Nonferrous Metals[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 1993. 88~128
张宝昌. 有色金属及其热处理[M]. 西安: 西北工业大学出版, 1993. 88~128

栏目编辑: 宋梅梅