

引文格式: 张文博, 胡京伟, 刘炳森, 等. 热处理对激光增材制造TC4ELI显微组织与拉伸性能的影响[J]. 航空制造技术, 2024, 67(18): 37-45.

ZHANG Wenbo, HU Jingwei, LIU Bingsen, et al. Effect of heat treatment on microstructure and tensile properties of laser additive manufacturing TC4ELI[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(18): 37-45.

热处理对激光增材制造TC4ELI显微组织与拉伸性能的影响*

张文博^{1,2}, 胡京伟^{1,2}, 刘炳森^{1,2}, 霍海鑫^{1,2}, 朱言言^{1,2,3}

- (1. 北京航空航天大学前沿科学技术创新研究院, 北京 100191;
2. 北京航空航天大学大型金属构件增材制造国家工程实验室, 北京 100191;
3. 北京航空航天大学宁波创新研究院, 宁波 315800)

[摘要] TC4ELI 钛合金具有优异的强塑性以及损伤容限性能, 广泛地应用于飞机的整体承力构件。但是通过增材制造的方法制造的 TC4ELI 钛合金构件, 由于其不同的原始 β 晶粒形貌以及显微组织, 往往需要采取与锻件不同的热处理方式。因此, 系统地研究了激光增材制造 TC4ELI 沉积态组织, 以及高温退火对激光增材制造 TC4ELI 的显微组织和力学性能的影响, 来得到适合于增材制造 TC4ELI 的热处理方式。结果表明, 随两相区退火温度上升, 初生 α 相宽度增加而含量下降, 且有此初生 α 相析出, 而单相区退火后, 仍为超细网篮组织。经过两相区高温退火后的 TC4ELI 钛合金, 其显微硬度下降, 抗拉强度略有增加, 屈服强度略有下降, 塑性变化不大, 各向异性改善不明显, 而单相区高温退火后, 强度略有增加, 塑性剧烈下降。不同于锻造 TC4ELI 的单相区高温退火, 增材制造 TC4ELI 在两相区双重退火强塑性匹配更优。

关键词: 激光增材制造; TC4ELI; 热处理; 显微组织; 力学性能

Effect of Heat Treatment on Microstructure and Tensile Properties of Laser Additive Manufacturing TC4ELI

ZHANG Wenbo^{1,2}, HU Jingwei^{1,2}, LIU Bingsen^{1,2}, HUO Haixin^{1,2}, ZHU Yanyan^{1,2,3}

- (1. Research Institute for Frontier Science, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. National Engineering Laboratory of Additive Manufacturing for Large Metallic Components, Beihang University, Beijing 100191, China;
3. Ningbo Institute of Technology, Beihang University, Ningbo 315800, China)

[ABSTRACT] TC4ELI titanium alloy is widely used in integral load carrying components of aircraft due to its excellent strength, ductility and damage tolerance. However, due to the different primary β grain morphology and microstructure of TC4ELI titanium alloy component manufactured by additive manufacturing, different heat treatment methods are often required from forgings. Therefore, to obtain a suitable heat treatment method for additive manufacturing TC4ELI, the microstructure of as-deposited TC4ELI titanium alloy fabricated by laser additive manufacturing and the effect of high-temperature annealing on the microstructure and mechanical properties of laser additive manufacturing TC4ELI titanium were studied. The results show that with the increase of annealing temperature in the dual-phase zone, the width of primary α phase increases, the content of primary α phase decreases, and the secondary α participates. After the single-phase zone annealing, TC4ELI titanium is still ultrafine basket-weave microstructure. The microhardness and yield strength of TC4ELI titanium alloy after annealing in the dual-phase zone decreases slightly, the tensile strength increases slightly, the ductility

* 基金项目: 科工局重点项目 (JPPT-2016-057); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (YWF-21-BJ-J-1143)。

dose not change much, and the anisotropy dose not improve significantly. However, the strength increases slightly and the ductility decreases significantly after annealing in the single-phase zone. Different from the annealing of forging TC4ELI in the single-phase zone, the strength and ductility matching of additive manufacturing TC4ELI is better after annealing in the dual-phase zone.

Keywords: Laser additive manufacturing; TC4ELI; Heat treatment; Microstructure; Mechanical properties

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2024.18.037

近些年来,随着航空工业的快速发展,比强度高、高温性能好、耐腐蚀的钛合金,广泛地应用于飞机的机身以及发动机之中^[1-3]。TC4ELI是一种中强双相钛合金,通过在TC4的基础上降低氧等杂质元素含量的方式得到,具有优异的损伤容限性能,广泛应用于飞机框、梁等大型整体关键承力构件。在美国第四代战斗机F-22中,单架飞机使用钛合金超过2721.55 kg,其中TC4ELI占73%,主要应用于翼梁、隔框及机体、前桁梁、后桁梁、纵梁等结构部件之中^[4]。激光增材制造技术采用逐层二维堆积实现任意复杂三维结构的制造原理,为大型整体钛合金构件制造提供了短周期、低成本新途径^[5-6]。通过激光增材制造技术快速成形TC4ELI结构件,充分发挥制造优势和性能优势,降低成本,提升性能,利于航空大型结构件的整体生产。

TC4ELI作为一种损伤容限钛合金,其室温组织是 $\alpha+\beta$ 双相组织,显微组织特征对最终构件的静力性能和损伤容限性能具有显著影响。彭小娜^[7]对比了锻造TC4ELI的两相区热处理与单相区热处理下的力学性能,发现两相区热处理下获得等轴与片层 α 相的双态组织,而单相区获得魏氏组织;与双态组织相比,魏氏组织明显具有更好的断裂韧性,因此认为锻造TC4ELI性能最优的热处理工艺为相变点以上20℃的单相区退火处理。郭萍等^[8-10]研究了锻造TC4ELI的热处理工艺对组织性能的影响,认为在相变点以下处理时,初生 α 相含量在20%以上时,断面收缩率保持在50%以上,但当 α 相含量减少时,合金塑性明显降低。而在相变点以上处理时,形成魏氏组织,塑性降低而断裂韧性增加。张宏硕^[11]研究了锻造TC4ELI高周疲劳的断裂机理,认为应力比为-1时,裂纹源在表面萌生,而应力比为0.5时,裂纹源萌生于表面与内部。赵庄^[12]对增材制造TC4ELI进行了三重热处理,处理工艺为980℃/1h/FC+920℃/1h/AC+600℃/4h/AC,发现处理后的试样断后伸长率提高了1倍。目前锻造TC4ELI热处理工艺已经比较成熟,最佳处理工艺为单相区退火处理。但对于增材制造TC4ELI,由于其不同的成形过程,具有柱状的 β 晶粒,以及超细 α 网篮组织,使得锻

造TC4ELI的热处理工艺可能已经不再适用于增材制造TC4ELI。所以,需要对增材制造TC4ELI进行一系列更详细的热处理试验与拉伸性能测试来优化热处理工艺参数。

本文面向大型整体TC4ELI钛合金构件激光增材制造技术需求背景,开展激光增材制造TC4ELI显微组织和力学性能调控研究。研究了高温退火温度对激光增材制造TC4ELI显微组织和室温拉伸性能的影响规律,分析了沉积态和热处理态的室温拉伸断口,对于增材制造TC4ELI构件的热处理工艺选择具有指导作用。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

本文采用的是等离子旋转电极雾化法制造的TC4ELI粉末,以此粉末为原料,用激光增材制造技术制造钛合金厚板样品。粉末原材料和成形试样的成分如表1所示,可以看到,TC4ELI板材氧含量略高于粉末,这是在激光熔化沉积过程中钛合金高温熔池发生了轻微的吸氧造成的。

沉积态TC4ELI的制造采用本课题组自主研发的LMD-V型激光成形系统,工艺参数选取:激光功率4~6 kW,扫描速率500~1500 mm/min,送粉速率15~25 g/min。一般的,为便于描述,将试样逐层增高的沉积方向称为L向或纵向,将垂直于沉积增高和激光扫描的方向称为T向或横向,对应的坐标系如图1(a)所示^[13]。增材制造TC4ELI沉积态试样如图1(b)所示,其长×高×厚尺寸为300 mm×350 mm×40 mm。

表1 TC4ELI钛合金粉末及厚板化学成分(质量分数)
Table 1 Chemical compositions of TC4ELI titanium alloy powder and plate (mass fraction) %

项目	Al	V	O	Fe	C	N	H
TC4ELI粉末	6.2	4.36	0.058	0.22	0.01	0.006	0.0016
TC4ELI板	6.2	4.04	0.075	0.2	0.016	0.012	0.0022

1.2 试验方法

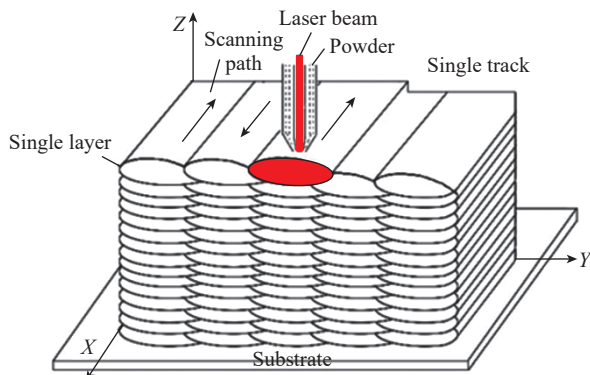
为了研究热处理工艺对增材制造 TC4ELI 显微组织与力学性能的影响,本文选用 12 mm × 12 mm × 10 mm 的试样进行热处理,热处理炉采用 SX2-10-12 型电阻炉。本研究根据 TC4ELI 的相变温度 T_{β} 制作了具体的热处理工艺。

经测试,TC4ELI 的相变点约为 975 °C,因此本研究选择 T_{β} 以下 965 °C、955 °C、945 °C 3 个退火温度进行高温退火处理,处理时间为 1 h,冷却方式为空冷。对于力学性能测定试样,本研究进行了 600 °C 的去应力退火处理,主要目的为消除残余应力,对显微组织与拉伸性能影响不大。退火处理过程如图 2 所示。

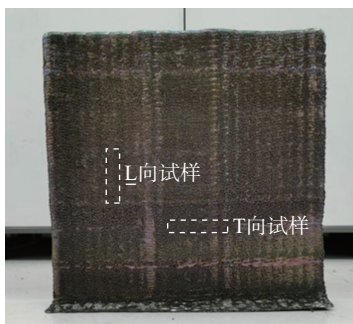
组织观察采用 12 mm (Z) × 12 mm (Y) × 10 mm (X) 的试样,使用 60#~2000# 水磨砂纸打磨后用 SiO₂ 悬浊液抛光,最后用 Kroll 溶液腐蚀。采用 LEICADM4000 光学显微镜(OM)与 JEOL6010 扫描电子显微镜(SEM)对显微组织进行观察。数据处理时,应用软件 Image J 进行 α 片层宽度和 α 相含量的测量。

采用 HAZ-1000 型半自动显微硬度计测量样品的硬度,得到试样的显微硬度 HV 值,选取载荷 500 g,保压时间 10 s。

拉伸性能的测试采用 GB/T 228.1—2020,拉伸试样



(a) 同轴送粉激光增材制造过程示意图^[13]



(b) 沉积态 TC4ELI 厚板

图 1 同轴送粉激光增材制造过程示意图及沉积态 TC4ELI 厚板
Fig.1 Schematic illustration of coaxial powder feeding laser additive manufacturing and as-deposited TC4ELI plate

选择为圆柱棒状试样,分别取自横向(T向)与纵向(L向),取样方式如图 1(b)所示。最后通过测试得到试样的抗拉强度 R_m 、屈服强度 $R_{p0.2}$ 、断后伸长率 A 、断面收缩率 Z 。每组室温拉伸试样取 3 根进行拉伸,最后计算其平均值。用扫描电镜观察断口的形貌。

2 结果与讨论

2.1 热处理对激光增材制造 TC4ELI 沉积态显微组织的影响

2.1.1 沉积态组织

激光增材制造 TC4ELI 沉积态试样各截面组织如图 3 所示。可以看到,在 YOZ 截面上均为柱状 β 晶粒,但是由于柱状晶并非垂直向上生长,而是与 z 轴成一定角度,因此截面看上去均为短柱状晶;在 XOY 截面上为柱状晶,测量发现柱状晶宽度约 1 mm;在 XOZ 截面上,距离表面 3~5 mm 的地方有一个与中心部分晶粒形状不同的边界区。在中心部分,晶粒呈柱状,高度可达几十 mm,柱状晶沿 z 向生长,而在边界区, β 晶粒则向外

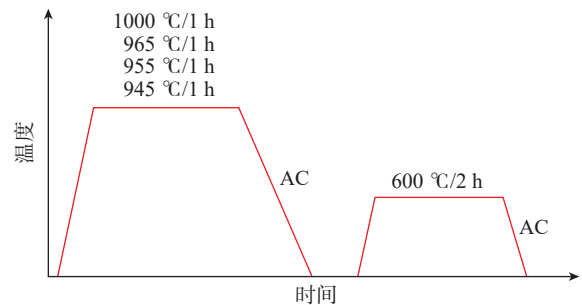


图 2 激光增材制造 TC4ELI 钛合金沉积态不同第一级退火温度示意图

Fig.2 Schematic illustration of different first stage annealing temperatures of as-deposited TC4ELI titanium alloy fabricated by laser additive manufacturing

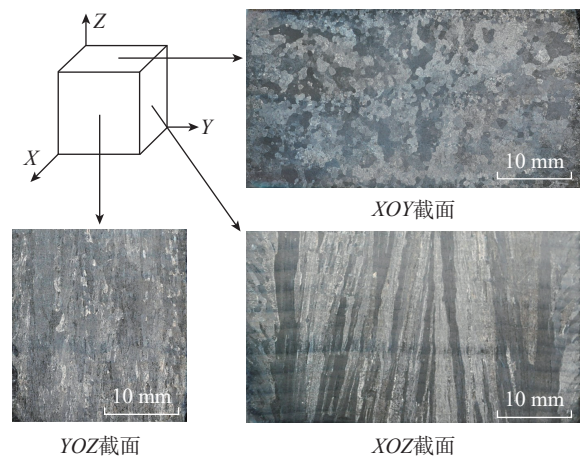


图 3 激光增材制造 TC4ELI 沉积态原始 β 晶粒形貌
Fig.3 Original β grain morphology of as-deposited TC4ELI titanium alloy fabricated by laser additive manufacturing

斜向上生长,这是由于熔池边缘在表面张力与重力作用下收缩,热流方向发生变化形成的。为了保证组织性能分析的准确性,本研究选取的显微组织或测量拉伸性能试样,都将避开此区域。中间的区域,在Z方向上均为原始 β 柱状晶,并未随沉积高度发生明显变化。同时可以看出,柱状晶的生长呈向中心倾斜,角度约为 5° 且关于中心面呈轴对称。这一现象是激光扫描时在两端的停留时间较长,造成两端沉积较高,熔池向内倾斜,热流方向发生变化导致的。

图4为激光增材制造TC4ELI钛合金沉积态显微组织形貌图。可以看到,增材制造TC4ELI显微组织为由 α 相组成的超细网篮组织。测量得到增材制造TC4ELI钛合金沉积态 α 板条宽度约为 $1.2\ \mu\text{m}$, α 相含量约为84%。观察晶界处显微组织发现,增材制造TC4ELI晶界处一般含有连续的晶界 α 相,且晶界 α 相厚度与晶内相近,也为 $1.2\ \mu\text{m}$ 左右,晶界 α 相两侧为朝向晶内生长的网篮组织,且晶界两侧组织的取向略有差别,很少能观察到有贯穿晶界生长的组织;同时也有少部分区域不含晶界 α 相。

增材制造过程中, α 相形核并沿 $\langle 1210 \rangle$ 优先结晶方向析出,且相邻 α 相之间的取向具有一定的相位关系^[14],且由于增材制造冷却速度较快, α 相形核较多,形成了超细网篮组织^[15]。对于晶界来说,大部分晶界处缺陷较多,形核能量低,所以在 β 相区冷却过程中,会优先在晶界处形核,生长成为连续的晶界 α 相,然后在这些晶界 α 相上向晶内生长出网篮组织;极少部分晶界处缺陷较少,无法形核生长为晶界 α 相^[16]。

2.1.2 热处理态显微组织

图5为激光增材制造TC4ELI沉积态在 $945\sim 1000\ ^\circ\text{C}$ 不同退火温度下的低倍组织,可以明显地看到,在相

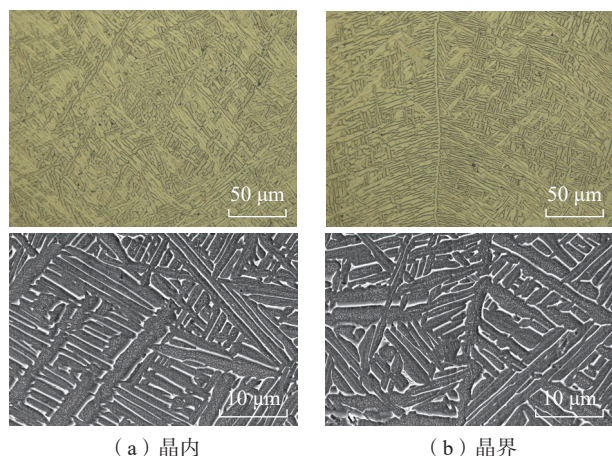


图4 激光增材制造TC4ELI沉积态显微组织

Fig.4 Microstructure of as-deposited TC4ELI titanium alloy fabricated by laser additive manufacturing

变点 T_β 以下处理时, β 晶粒无明显变化,依然为柱状晶,且柱状晶变化不大,不同高温退火温度时,柱状晶长度宽度基本相同。

而在退火温度达到相变点 T_β 之上时,柱状 β 晶粒转变为等轴 β 晶粒,主要原因为随温度的升高, α 相渐渐转变为 β 相,直至相变点时, α 相完全消失,原始柱状 β 晶粒中存在小角度的亚晶界,发生了再结晶与晶粒长大,因此转变为了全等轴晶组织^[17]。而对于锻件来说,随退火温度上升,锻造TC4ELI的等轴 α 相不断拉长,并转变为 β 相,且 β 晶粒逐渐长大,直至达到相变点时 α 相完全变成板条状,形成魏氏组织^[18],与增材制造的 β 晶粒突变过程有所不同。

图6为激光增材制造TC4ELI不同退热温度下的晶内显微组织图。可以看到,经过两相区高温退火之后, α 相由原来的超细网篮组织变成了含有初生 α 相与次生 α 相的双态组织。且随退火温度的升高,初生 α 相的宽度增大。热处理态初生 α 片层宽度与 α 相含量如表2所示。而在单相区高温退火时,仍为超细网篮组织,测量发现, α 片层宽度约为 $1\ \mu\text{m}$,略低于沉积态。

比较发现两相区处理时,随退火温度升高,初生 α 相的含量下降,且宽度增加,明显高于沉积态。这是由于温度越高,距离相变点越近, α 相转变为 β 相越明显,直到达到相变点 T_β 时, α 相完全消失。本研究均为相变点以下高温退火,因此会有一定量的初生 α 相,退火温度越低,初生 α 相越多。而在后续的保温与冷却过程中,初生 α 片层会有一定程度的生长,温度越高,则初生 α 片层生长速度越快,片层宽度越大。同时可以观察到,经过高温退火,初生 α 片层的长径比减小。

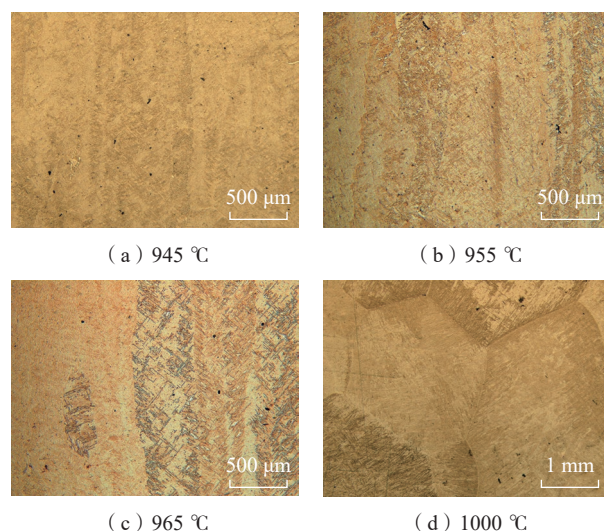


图5 激光增材制造TC4ELI不同退火温度 β 晶粒形貌

Fig.5 β grain morphology of TC4ELI titanium alloy fabricated by laser additive manufacturing at different annealing temperatures

图 7 为激光增材制造 TC4ELI 沉积态与不同热处理下的 3000 倍扫描照片。可以明显地观察到两相区处理时析出的细小片层状的次生 α 相。这些次生 α 相往往平行生长,与其紧邻的初生 α 片层取向相同,整体构成一个集束。同时,初生 α 片层的端部形成了类似于蟹爪状的组织。这是由于在空冷过程中,当温度由单相区降低至两相区时, β 相向 $\alpha+\beta$ 相扩散分解, α 相沿 $\langle 1210 \rangle$ 优先结晶方向在初生 α 相边缘优先外延生长,在初生 α 相的端部析出,并平行生长而形成的^[19]。

两相区高温退火对于增材制造 TC4ELI 的影响主要为影响 α 相。相变点以下时,随处理温度升高时, β 晶粒本身尺寸无变化, β 晶粒中的 α 相逐渐转变为 β 基体,直至接近相变点温度。此时保温,将会继续促进 α 相生长。保温结束后,在降温的过程中,由于过冷形核,产生了比初生 α 相细小的次生 α 相,初生 α 相与次生 α 相继续在冷却的过程中生长。空冷的冷速较快,会有大量的形核过程,生长出的次生 α 片层不但细小,而且取向一致,形成 α 集束如图 7 所示。

测量次生 α 片层的宽度与含量,得到表 3。发现其宽度相较初生 α 片层很小,且宽度随温度变化不明显,含量随温度上升而稍有增加。这是由于随退火温度的上升,初生 α 片层转变为 β 基体,温度越高则残余的初生 α 片层越少, β 基体所占比例越多,因此冷却过程中析出的次生 α 片层越多。

图 8 所示为增材制造 TC4ELI 不同温度退火后的晶界处显微组织,可见晶界 α 相在处理后就仍然存在,且两相区退火晶界宽度明显高于沉积态,单相区退火晶界宽度变化不大。同时随温度升高,晶界粗化并不明显。在两相区高温退火时,晶界已经出现一定程度的破碎,而晶内无此现象。且在 945 $^{\circ}\text{C}$ 、955 $^{\circ}\text{C}$ 处理时,晶界破碎更明显。

在晶内 α 片层析出时,往往与 β 基体保持一定的取向关系,因此界面能较小,在两相区上部热处理时 α 片层并无明显变化。而对于晶界处,晶界 α 相则与 β 基体取向复杂,存在界面能较高的非共格界面^[20-21],因此晶界 α 相趋向于通过减小自己单位体积的表面积来降低界面能,所以晶界在高温退火过程中会重新生长。

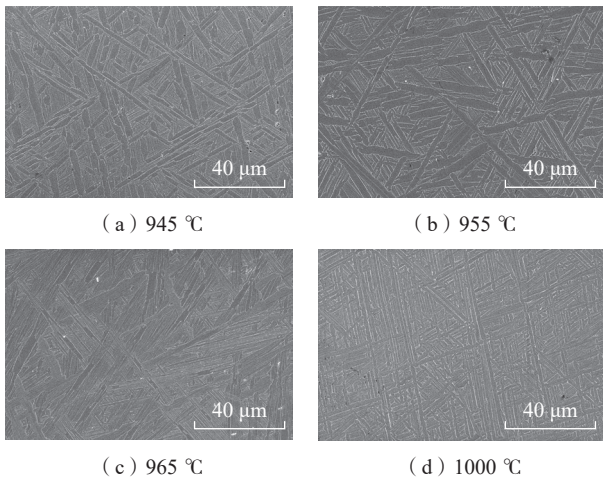


图 6 激光增材制造 TC4ELI 不同退火温度低倍晶内微观组织
Fig.6 Low magnification intracrystalline microstructure of TC4ELI titanium alloy fabricated by laser additive manufacturing at different annealing temperatures

表 2 增材制造 TC4ELI 不同退火温度下的初生 α 片层宽度与含量
Table 2 Lamellar width and content of primary α phase in laser additive manufacturing TC4ELI titanium alloy at different annealing temperatures

退火温度/ $^{\circ}\text{C}$	初生 α 相片层宽度/ μm	初生 α 相含量/%
945	2.9	52
955	3.5	37
965	3.7	34

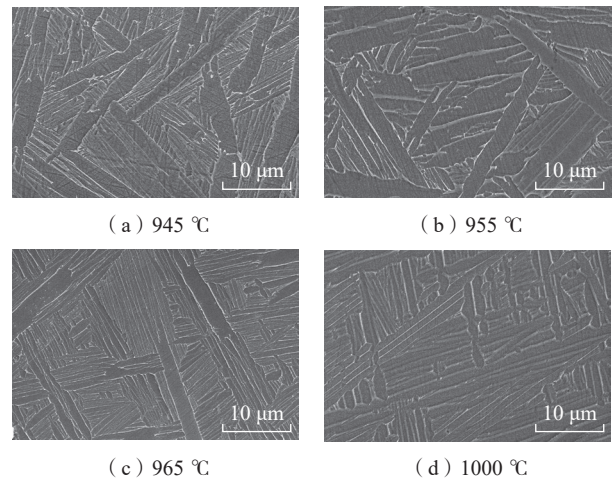


图 7 激光增材制造 TC4ELI 不同退火温度高倍晶内微观组织
Fig.7 High magnification intracrystalline microstructure of TC4ELI titanium alloy fabricated by laser additive manufacturing at different annealing temperatures

表 3 增材制造 TC4ELI 不同退火温度下的次生 α 片层宽度与含量
Table 3 Width and content of secondary α phase in laser additive manufacturing TC4ELI titanium alloy at different annealing temperatures

退火温度/ $^{\circ}\text{C}$	次生 α 相片层宽度/ μm	次生 α 相含量/%
945	0.4	16
955	0.45	35
965	0.43	34

2.2 热处理对激光增材制造 TC4ELI 试样力学性能的影响

2.2.1 显微硬度

表 4 为激光增材制造 TC4ELI 沉积态与不同热处理态的显微硬度数据,测试条件为压力 500 N 保压 15 s。可以看出,在相变点以下高温退火时,其显微硬度对比沉积态略有下降,这是由 α 片层厚度增大导致的结果。且随高温退火温度的升高,合金的硬度变化不大。这是由初生 α 片层厚度增加导致的硬度减小,而 α 相含量下降使硬度增加导致的。而在相变点以上温度高温退火时,显微硬度有明显的下降。

2.2.2 室温拉伸性能

激光增材制造 TC4ELI 沉积态与不同退火温度的室温拉伸性能如表 5 所示,部分温度的应力-应变曲线如图 9 所示。可以看出,沉积态 TC4ELI 钛合金的抗拉强度与屈服强度属于中强度钛合金水平,但是具有很高的断后伸长率与断面收缩率,代表其具有很好的塑性。而与沉积态 TC4ELI 试样相比,两相区高温退火后的试

样抗拉强度略有上升,而屈服强度略有下降,塑性变化不明显。且随着退火温度的上升,并未发现抗拉强度与屈服强度有明显的变化规律,整体变化不明显。塑性方面,随两相区退火温度的上升,塑性变化不大。而相变

表 5 激光增材制造 TC4ELI 不同退火温度的室温拉伸性能
Table 5 Tensile properties of laser additive manufacturing TC4ELI at different annealing temperatures

退火温度/℃	拉伸方向	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	断后伸长率/%	断面收缩率/%
沉积态	L	826	761	16	51
	T	867	807	11	40
945	L	856	753	16.8	52.0
	T	873	797	11.0	39.5
955	L	837	736	17.8	56.0
	T	880	803	14.0	36.5
965	L	840	744	14.8	50.0
	T	851	775	11.2	45.0
1000	L	846	786	7.0	20.7
	T	876	806	6.3	15.0

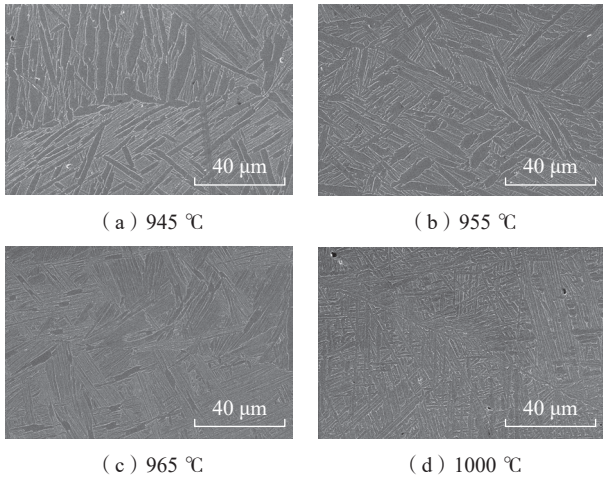


图 8 激光增材制造 TC4ELI 不同退火温度晶界微观组织
Fig.8 Grain boundary microstructure of TC4ELI titanium alloy fabricated by laser additive manufacturing at different annealing temperatures

表 4 激光增材制造 TC4ELI 不同退火温度的显微硬度
Table 4 Microhardness of TC4ELI titanium alloy fabricated by laser additive manufacturing at different annealing temperatures

退火温度/℃	显微硬度 (HV)
沉积态	345
945	318
955	318
965	324
1000	306

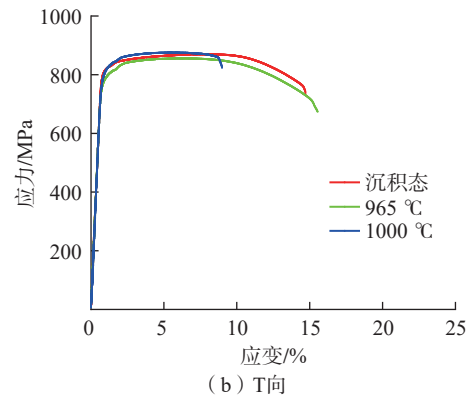
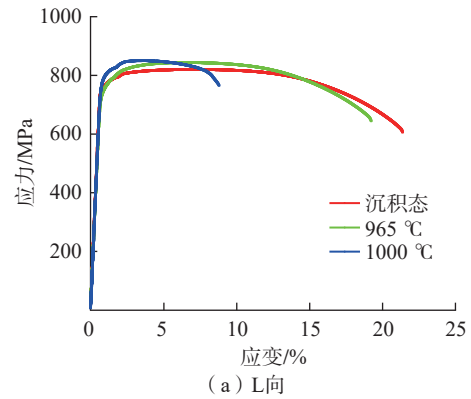


图 9 激光增材制造 TC4ELI 室温拉伸应力-应变曲线
Fig.9 Tensile stress-strain curves at room temperature of TC4ELI titanium alloy fabricated by laser additive manufacturing

点以上高温退火试样抗拉强度略有上升,屈服强度变化不大,塑性下降较多。与锻造 TC4ELI 对比,增材制造 TC4ELI 在相变点以上高温退火空冷后,并没有出现强度下降的现象^[8],但两者均有塑性下降现象。但由于增材制造 TC4ELI 沉积态本身具有优异的塑性,使得单相区退火塑性下降严重,不再适合作为增材制造 TC4ELI 的热处理工艺。

对于两相区热处理而言,在 β 晶粒大小变化不明显的条件下,决定其强度与塑性的主要为晶内裂纹扩展的难易程度,在位错滑移的过程中, β 基体与 α 片层之间的相界面为主要的阻力。当 α 片层宽度较小时,对位错滑移的阻碍较大,由于高温退火析出了大量细小的次生 α 集束,长径比较大,对位错滑移具有一定的阻碍作用,使得激光增材制造 TC4ELI 的抗拉强度与沉积态相比上升。但由于同时存在着宽度较大的初生 α 片层,使得合金先在初生 α 片层处屈服,因此屈服强度与沉积态相比反而下降。并且对于所有两相区高温退火合金,两种片层对于材料的作用相反,使得在 945~965 °C 下退火时,热处理温度对于增材制造 TC4ELI 的强度和塑性整体影响不大。在相变点以上热处理时,晶粒内的 α 片层全部转化为 β 基体,在后续的空冷过程中,由于冷速较快,又重新析出了 α 片层,由于没有增材制造过程中后续沉积层对其的影响,宽度略小于沉积态,因此材料强度略有上升。且 β 晶粒经过再结晶,变为球形,并长大,导致塑性下降较大。

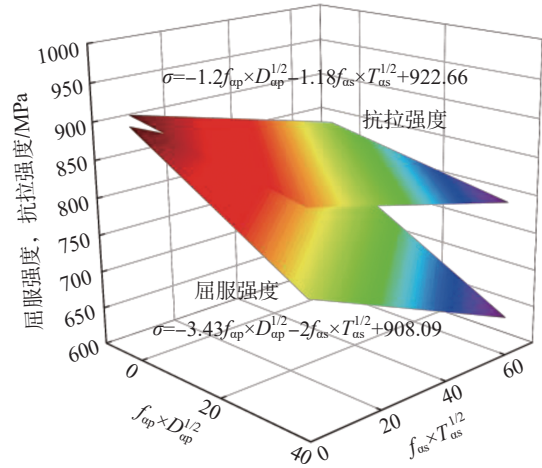
分别对比沉积态与热处理后试样的横纵向抗拉强度发现,处理后的试样,其横纵向抗拉强度差值略有减小,一定程度上减小了材料的各向异性,但并不能消除材料的各向异性。

综上所述,经过两相区高温退火,增材制造 TC4ELI 钛合金抗拉强度略有上升,屈服强度略有下降。而经过单相区高温退火,增材制造 TC4ELI 钛合金强度略有上升,塑性下降明显。因此,与锻件的单相区热处理不同,增材制造 TC4ELI 钛合金在 945~965 °C 进行两相区双重退火热处理时,其强塑性匹配更优。

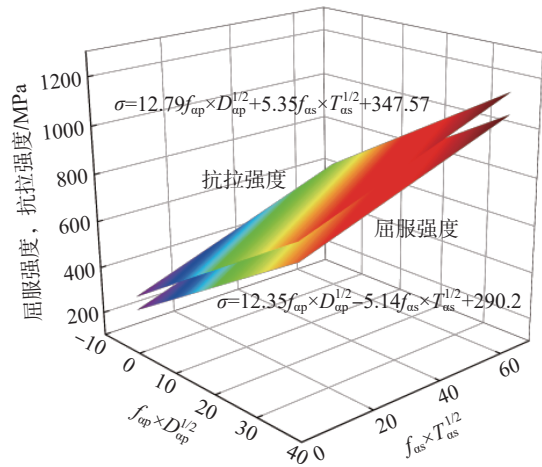
初生 α 片层与次生 α 片层对抗拉强度与屈服强度的影响可以用以下关系式来表达^[22]。

$$\sigma_i = \sigma_0 + \frac{k_i^1 f_{ap}}{\sqrt{D_{ap}}} + \frac{k_i^2 f_{as}}{\sqrt{T_{as}}} \quad (i = YS, UTS) \quad (1)$$

式中, f_{ap} 与 f_{as} 分别表示初生 α 相与次生 α 相的体积分数; D_{ap} 与 T_{as} 分别表示初生 α 片层与次生 α 片层的宽度; σ_0 , k_i^1 与 k_i^2 为常量。将表 2、3 与 5 的数据代入式(1)可以得到抗拉强度、屈服强度与初生 α 片层、次生 α 片层之间的关系,如图 10 所示。一般的,细小的次生 α 片



(a) L向



(b) T向

图 10 激光增材制造 TC4ELI 强度与 α 相含量和 α 片层宽度关系
Fig.10 Relationship of strength of TC4ELI titanium alloy fabricated by laser additive manufacturing and content and lamellar width of α phase

层占比越多,且两种 α 片层宽度越小,则强度越高。

图 11 所示为增材制造 TC4ELI 不同退火温度下纵向试样的室温拉伸断口形貌,图 12 为横向试样的室温拉伸断口形貌。可以看出,增材制造 TC4ELI 各种热处理制度下的断口形貌均为典型的塑性断裂断口,主要是穿晶断裂,有明显的纤维区与剪切唇。其中,纤维区的面积较大,其余几乎全部为剪切唇,观察不到放射区,说明塑性较好。在高倍形貌图中可以看出,断口上有很多的韧窝,几乎观察不到解理的花样,也说明了塑性较好。

观察不同热处理态的断口形貌可以看出,与单相区高温退火试样相比,沉积态试样与两相区退火试样的纤维区占比增大,而剪切唇占比减小,且韧窝明显比单相区退火试样大而深,表现为具有更好的塑性。

观察横纵向试样的断口形貌发现,对于沉积态试样与两相区退火试样,纵向断口具有更大更深的韧窝,而

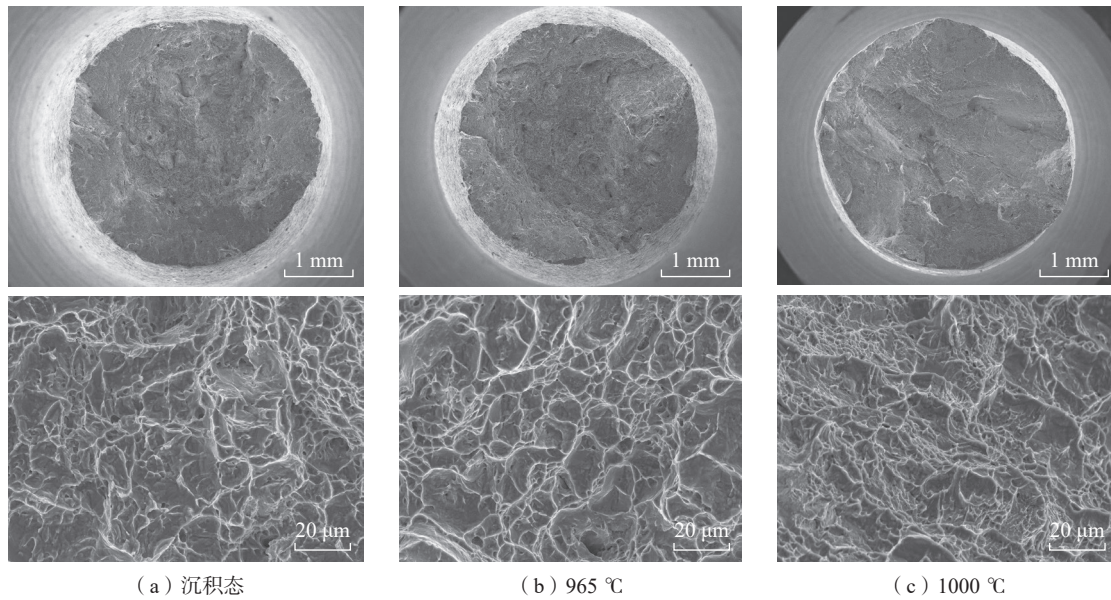


图 11 激光增材制造 TC4ELI 不同退火温度下的 L 向拉伸断口形貌

Fig.11 Tensile fracture morphology of laser additive manufacturing TC4ELI in L direction at different annealing temperatures

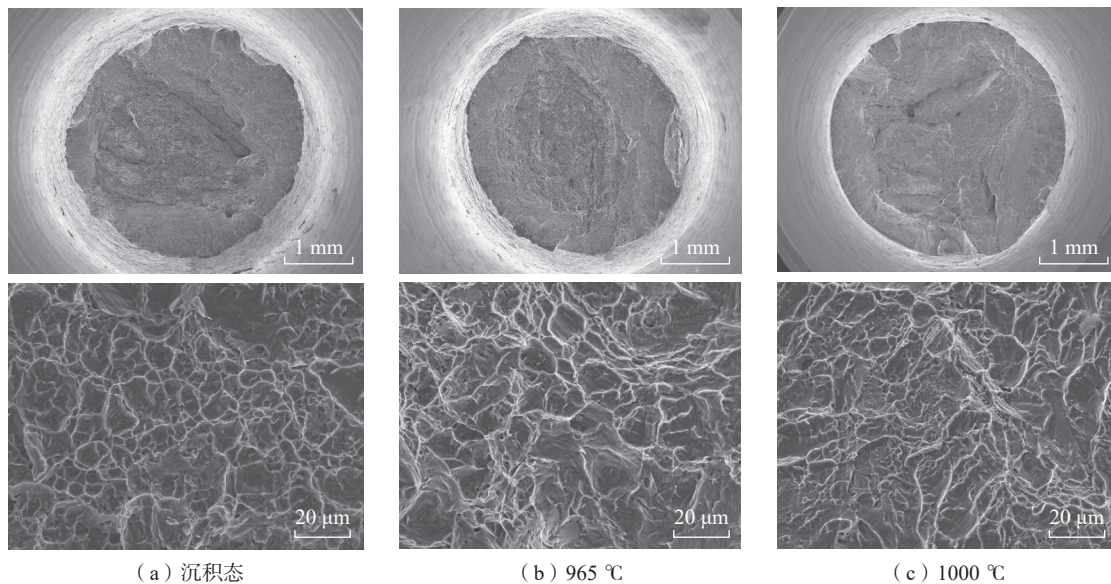


图 12 激光增材制造 TC4ELI 不同退火温度下的 T 向拉伸断口形貌

Fig.12 Tensile fracture morphology of laser additive manufacturing TC4ELI in T direction at different annealing temperatures

单相区退火试样的横纵向韧窝大小类似。

3 结论

研究了热处理对激光增材制造 TC4ELI 显微组织和室温拉伸性能的影响,主要结论如下。

(1) 两相区高温退火时,β 晶粒仍为柱状,退火主要对初生 α 片层厚度、含量影响较大,且会产生次生 α 相,进而影响材料的力学性能。随着退火温度从 945 °C 升

高到 965 °C,初生 α 片层厚度增加,含量下降,次生 α 片层厚度变化不明显,且高温退火后的试样,晶界会有一定程度的破碎。单相区高温退火时,β 晶粒等轴化,α 片层仍为超细网篮组织。

(2) 两相区高温退火后的试样,抗拉强度略有增加,屈服强度略有下降,整体变化程度随退火温度变化不大;退火后的试样依旧具有良好的塑性,断后伸长率与断面收缩率变化不大;退火后各向异性改善不明显。随

着两相区退火温度的变化,增材制造 TC4ELI 力学性能变化不明显。而单相区高温退火后试样,强度略有增加,塑性下降明显,不再适用于作为增材制造 TC4ELI 的热处理工艺。

(3) 综合强度与塑性,不同于锻造 TC4ELI 的单相区退火热处理,激光增材制造 TC4ELI 在 945~965 °C 进行两相区高温退火时,具有较好的强塑性匹配。

参考文献

- [1] BANERJEE D, WILLIAMS J C. Perspectives on titanium science and technology[J]. *Acta Materialia*, 2013, 61(3): 844-879.
- [2] 雷霆. 锗冶金[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2011.
- LEI Ting. Germanium metallurgy[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2011.
- [3] BOYER R R. An overview on the use of titanium in the aerospace industry[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 1996, 213(1-2): 103-114.
- [4] 刘志成, 张利军, 薛祥义. 关于先进战斗机结构制造用钛概述[J]. *航空制造技术*, 2017, 60(6): 76-83.
- LIU Zhicheng, ZHANG Lijun, XUE Xiangyi. Overview about advanced fighter aircraft structure made with titanium[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2017, 60(6): 76-83.
- [5] WANG T, ZHU Y Y, ZHANG S Q, et al. Grain morphology evolution behavior of titanium alloy components during laser melting deposition additive manufacturing[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 632: 505-513.
- [6] BANERJEE R, COLLINS P C, BHATTACHARYYA D, et al. Microstructural evolution in laser deposited compositionally graded α/β titanium-vanadium alloys[J]. *Acta Materialia*, 2003, 51(11): 3277-3292.
- [7] 彭小娜. 损伤容限型 TC4-DT 合金锻件组织性能控制研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2014.
- PENG Xiaona. Study on microstructure and properties control of damage tolerance TC4-DT alloy forgings[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2014.
- [8] 郭萍, 赵永庆, 洪权, 等. 损伤容限型 TC4-DT 钛合金性能[J]. *稀有金属材料与工程*, 2013, 42(11): 2367-2370.
- GUO Ping, ZHAO Yongqing, HONG Quan, et al. Properties of damage tolerance TC4-DT titanium alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2013, 42(11): 2367-2370.
- [9] 郭萍. TC4-DT 钛合金损伤行为研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2015.
- GUO Ping. Research on damage behaviors of TC4-DT titanium alloys[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2015.
- [10] 郭萍, 赵永庆, 洪权, 等. TC4-DT 钛合金疲劳裂纹扩展的微观机制[J]. *材料导报*, 2019, 33(20): 3448-3451.
- GUO Ping, ZHAO Yongqing, HONG Quan, et al. Microscopic mechanism of fatigue crack propagation in TC4-DT titanium alloy[J]. *Materials Reports*, 2019, 33(20): 3448-3451.
- [11] 张宏硕. TC4-DT 钛合金疲劳寿命表征及断裂机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- ZHANG Hongshuo. The fatigue life characterization and fracture mechanism of TC4-DT titanium alloy[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [12] 赵庄. 激光立体成形 TC4-DT 合金晶内亚结构及强韧化调控[D]. 西安: 西北工业大学, 2018.
- ZHAO Zhuang. Intragranular substructure of TC4-DT alloy by laser stereo forming and its strengthening and toughening regulation[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2018.
- [13] 刘炳森, 张述泉, 张纪奎, 等. 层间冷却对激光增材制造 TC17 钛合金组织和拉伸性能的影响[J]. *中国激光*, 2022, 49(14): 1402204.
- LIU Bingsen, ZHANG Shuquan, ZHANG Jikui, et al. Effect of interlayer cooling on structure and tensile properties of TC17 titanium alloy fabricated by laser additive manufacturing[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(14): 1402204.
- [14] YANG J W, TANG H B, LI R K, et al. Origin of aspect ratio decreasing and variant selection for alpha laths in laser directed energy deposited TC11-xB alloys: Spatial inhibition and selective coarsening in thermal cycle[J]. *Materials Characterization*, 2022, 193: 112330.
- [15] ZHU Y Y, TIAN X J, LI J, et al. Microstructure evolution and layer bands of laser melting deposition Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si titanium alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, 616: 468-474.
- [16] ZHU Y Y, LIU D, TIAN X J, et al. Characterization of microstructure and mechanical properties of laser melting deposited Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si titanium alloy[J]. *Materials & Design (1980-2015)*, 2014, 56: 445-453.
- [17] ZHU Y Y, TIAN X J, LI J, et al. The anisotropy of laser melting deposition additive manufacturing Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si titanium alloy[J]. *Materials & Design*, 2015, 67: 538-542.
- [18] 彭小娜, 郭鸿镇, 秦春, 等. TC4-DT 钛合金两种不同预处理状态下的 β 晶粒等温长大动力学[J]. *稀有金属材料与工程*, 2014, 43(8): 1855-1861.
- PENG Xiaona, GUO Hongzhen, QIN Chun, et al. Isothermal beta grain growth kinetics of TC4-DT titanium alloy under two different prior processing conditions: Deformed vs. undeformed[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2014, 43(8): 1855-1861.
- [19] LU Y, TANG H B, FANG Y L, et al. Microstructure evolution of sub-critical annealed laser deposited Ti-6Al-4V alloy[J]. *Materials & Design*, 2012, 37: 56-63.
- [20] BHATTACHARYYA D, VISWANATHAN G B, FRASER H L. Crystallographic and morphological relationships between β phase and the Widmanstätten and allotriomorphic α phase at special β grain boundaries in an α/β titanium alloy[J]. *Acta Materialia*, 2007, 55(20): 6765-6778.
- [21] FURUHARA T, HOWE J M, AARONSON H I. Interphase boundary structures of intragranular proeutectoid α plates in a hypoeutectoid Ti-Cr alloy[J]. *Acta Metallurgica et Materialia*, 1991, 39(11): 2873-2886.
- [22] CHEN Y Y, DU Z X, XIAO S L, et al. Effect of aging heat treatment on microstructure and tensile properties of a new β high strength titanium alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, 586: 588-592.

通讯作者: 朱言言, 副研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事金属增材制造方面的研究。

(责编 阳光)