

激光熔覆沉积含硼 TC4 钛合金力学性能的各向异性

霍浩¹, 梁朝阳², 张安峰^{1*}, 张晓星³, 张金智¹, 王豫跃³

¹西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西 西安 710054;

²中国人民解放军 63850 部队, 吉林 白城 137000;

³西安交通大学金属材料强度国家重点实验室, 陕西 西安 710049

摘要 针对激光熔覆沉积 TC4 钛合金力学性能较低, 不能达到锻件标准且力学性能各向异性较大的问题, 通过机械搅拌预制不同硼含量的 TC4 粉体, 使用预制粉体进行激光熔覆沉积实验, 以达到调控微观组织、提高综合力学性能的目的。结果表明: 当硼质量分数为 0.050% 时, 沉积态 TC4 钛合金的力学性能均超过锻件标准, 屈服强度和抗拉强度分别为 1049 MPa 和 1136 MPa, 延伸率和断面收缩率分别达到 11.50% 和 33.5%, 但塑性各向异性高达 30% 以上; 经过 950 °C × 1 h/空冷 + 500 °C × 4 h/空冷固溶时效热处理后, 综合力学性能进一步提高, 在保证强度的同时, 延伸率和断面收缩率分别达到 16.70% 和 37.3%, 且各向异性小于 5%。

关键词 激光技术; 各向异性; 钛合金; 激光熔覆沉积; 硼; 微观组织

中图分类号 TG665; TG146.2+3

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1202008

Anisotropy of Mechanical Properties of Laser-Cladding-Deposited TC4 Titanium Alloy Containing Boron

Huo Hao¹, Liang Zhaoyang², Zhang Anfeng^{1*}, Zhang Xiaoxing³,
Zhang Jinzhi¹, Wang Yuyue³

¹State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

²Chinese People's Liberation Army 63850 Army, Baicheng, Jilin 137000, China;

³State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China

Abstract The laser-cladding-deposited TC4 titanium alloy is considerably anisotropic, and its mechanical properties are lower than the forging standards. In this study, boron (B) with different mass fractions is uniformly mixed into the TC4 powder by mechanical stirring, refining the microstructure and improving the comprehensive mechanical properties of the alloy. Results show that at a B mass fraction of 0.050%, the mechanical properties of the deposited TC4 titanium alloy exceed the forging standard, and the yield and tensile strengths become 1049 MPa and 1136 MPa, respectively. Furthermore, the elongation and area reduction become 11.50% and 33.5%, respectively, though the plastic anisotropy is larger than 30%. After solid solution and aging heat treatment with 950 °C × 1 h/air cooling + 500 °C × 4 h/air cooling, the comprehensive mechanical properties are further optimized and the anisotropy is reduced to less than 5%. While we ensure suitable mechanical strength, the elongation and area reduction are enhanced to 16.70% and 37.3%, respectively.

Key words laser technique; anisotropy; titanium alloy; laser cladding deposition; boron; microstructure

OCIS codes 140.3390; 350.3390; 160.3900

收稿日期: 2019-05-16; 修回日期: 2019-07-26; 录用日期: 2019-08-22

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB1100102)、国家自然科学基金(51775417)

* E-mail: zhangaf@mail.xjtu.edu.cn

1 引 言

激光熔覆沉积(LCD)技术是一种新型的先进制造技术,它以金属粉体为成形原料,以高能束的激光作为热源,根据成形零件 CAD 模型分层切片信息的加工路径,以逐层熔化、快速凝固、逐层沉积的方式实现整个金属零件的直接制造^[1-3]。TC4 钛合金具有高强度、大变形抗力的特点,采用传统技术对其进行加工的难度很大,而 LCD 技术则可很好地解决这一问题。利用 LCD 成形的 TC4 钛合金结构件(LCD-TC4)的强度已能达到甚至超过锻件水平,但塑性较差,并且力学性能存在明显的各向异性,不能直接应用,严重阻碍了 LCD 技术在航空航天领域的应用。在 Dinda 等^[4]的研究中,LCD-TC4 的屈服强度高达 1105 MPa,但延伸率仅为 4%;在 Hollander 等^[5]和 Zhu 等^[6]的研究中,LCD-TC4 的屈服强度大于 1100 MPa,而延伸率仅为 6.5%。Kobryn 等^[7]采用 LCD 技术直接成形了 TC4 钛合金结构件,其延伸率仅为 0.8%,但利用热等静压工艺处理后,LCD-TC4 的延伸率提高到了 11.8%。陈静等^[8]成形的沉积态 TC4 钛合金的延伸率仅为 5.1%,断面收缩率仅为 17.0%,经固溶时效热处理后,钛合金的延伸率提高到了 13.5%,断面收缩率则达到了 41.5%。李静等^[9]也进行了相同的研究。虽然 TC4 钛合金经后续工艺处理后的塑性得到了较大提升,但仍存在较大的各向异性^[10],而航空航天结构件要求材料必须具有较好的各向同性。因此,如何解决

LCD-TC4 塑性差和各向异性明显的问题成为当前的研究热点。

沉积态 LCD-TC4 强度高、塑性差、各向异性明显的主要原因是其组织中含有贯穿多个熔覆层的粗大柱状晶。通过加入少量变质剂硼细化 TC4 晶粒的做法已在焊接、铸造和锻造中有较多应用^[11-12],受此启发,本文将少量硼均匀地混入 TC4 粉体中进行 LCD 实验,目的是减少沉积态 LCD-TC4 中的柱状晶并细化晶粒;然后在保证强度的前提下,通过感应加热与热处理工艺对沉积态 LCD-TC4 进行热处理,以提高 LCD-TC4 的塑性并减小其各向异性,从而为 LCD-TC4 在航空航天领域的应用提供一种新方法。

2 实 验

2.1 实验装置

LCD 的工作原理如图 1^[13]所示,其中 CNC 为计算机数字控制台,IPC 为工业控制计算机。实验在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 LCD 成形系统上进行,并在其中加入感应加热设备,感应加热设备为 25 kW 的中频感应加热器,频率范围为 1~20 kHz,可以通过调节主控制机的工作电流(调节范围为 0~1150 A)改变加热速度和起始保温时间。实验用 TC4 钛合金粉体粒径为 50~150 μm ,硼粉体粒径为 10~20 μm ,基板为 120 mm \times 60 mm \times 6 mm 的 TC4 板材。TC4 粉体和 TC4 基板的主要化学成分如表 1^[13]所示。

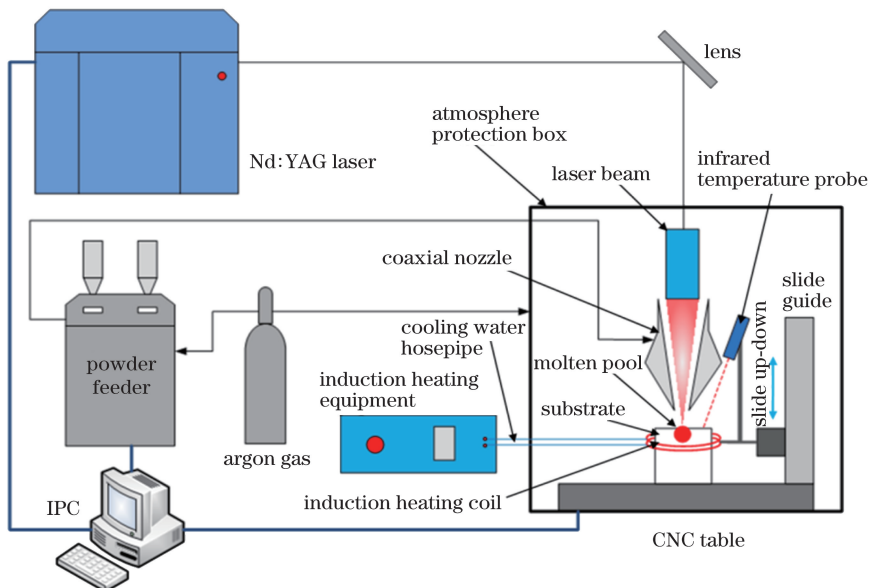


图 1 LCD 技术工作原理示意图^[13]

Fig. 1 Working principle of LCD technology^[13]

表 1 TC4 粉体和 TC4 基板的主要化学成分^[13]

Table 1 Main chemical compositions of TC4 powder and TC4 substrate^[13]

TC4	Mass fraction /%							
	Al	V	Fe	C	O	N	H	Ti
Powder	6.1	4.1	0.10	0.01	0.13	<0.01	0.001	Bal.
Substrate	6.2	4.3	0.13	0.02	0.12	0.01	0.002	Bal.

2.2 实验方法

制备 TC4-硼混合粉体(TC4-B)。首先将准备好的 TC4 粉体和硼粉体置于真空干燥箱中,在 120 ℃下保温 2 h,以去除粉体中的水分,提高粉体的流动性,使粉体的混合更加均匀;然后利用 SBH-20 型三维混合机,在转速为 40 r/min 的条件下,对

干燥后的 TC4 粉体和硼粉体进行 4 h 混合,粉体制备完成。实验前将混合后的 TC4-B 再次进行干燥,基材表面经砂轮打磨后,用丙酮和酒精清洗,以去除其表面的油渍和氧化膜。成形过程在氩气保护下进行,并以氩气作为载粉气。LCD 过程工艺参数如表 2 所示。

表 2 LCD 工艺参数

Table 2 Process parameters of LCD

Laser power /W	Scanning speed /($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	Powder delivery /($\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$)	Lap distance /mm	Lift amount /mm	Power density /($\text{J}\cdot\text{mm}^{-2}$)
180	10	2.5	0.2	0.1	30.5

前人的实验表明,在铸造、锻造、焊接中,加入的硼的质量分数为 0.050%时 TC4 的性能最优。此外,梁朝阳等^[13]的研究显示,将硼作为变质剂均匀地混合到 TC4 粉体中可以显著地细化 LCD-TC4 的晶粒,这是因为在凝固过程中硼原子析出并富集在固-液界面处,此处的成分过冷度增大,导致钛合金的熔点减小,促进了 TC4 自身的形核,并增大了形核率,从而达到了细化晶粒的目的。鉴于此,本实验采用硼质量分数分别为 0.025%、0.050%、0.075%、0.100%的 TC4 粉体进行 LCD 成形实验,然后对

LCD-TC4 试样进行室温拉伸测试,每组拉伸试样均为 3 个,采用 Instron[®]材料试验机进行拉伸测试,载荷范围为 5~100 kN,准确度为 $\pm 0.5\%$ 。成形试样的尺寸为 21 mm \times 8 mm \times 45 mm,然后将其进行三等分切割,即每个成形试样可以制成 3 个拉伸试样,拉伸试样尺寸参照国家标准 GB/T 228.1-2010 进行制备,试样的尺寸如图 2 所示。采用实验结果最优的硼质量分数进行各向异性实验,即采用硼质量分数为 0.050%的 TC4 钛合金粉末进行成形实验,成形的横向、竖向试样尺寸如图 3 所示。

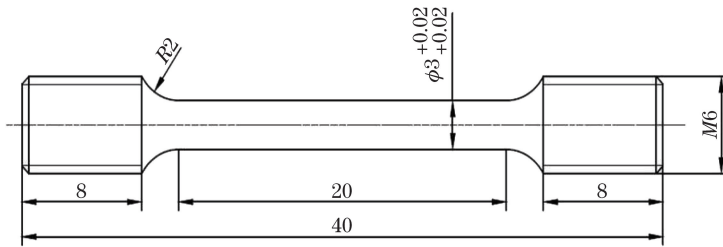


图 2 标准拉伸试样的尺寸

Fig. 2 Size of standard tensile specimen

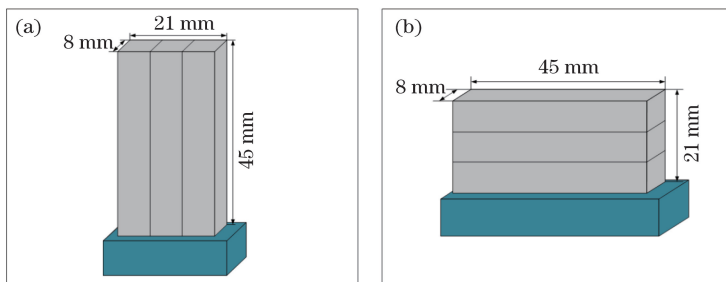


图 3 横向、竖向试样的尺寸示意图。(a)竖向试样;(b)横向试样

Fig. 3 Dimensional schematic of horizontal and vertical specimens. (a) Vertical specimen; (b) horizontal specimen

3 结果与讨论

3.1 硼对沉积态 LCD-TC4 力学性能的影响

根据实验方案,分别对含硼质量分数为 0.025%、0.050%、0.075%、0.100% 的沉积态 LCD-TC4 成形试样以及不含硼的沉积态 LCD-TC4 成形试样进行拉伸测试,测试结果如表 3 所示,ASTM B381-05 为锻件要求的最低标准。

由表 3 可知:当硼的质量分数为 0.050% 时,成形试样的塑性最好,并且强度和塑性均超过锻件标

表 3 不同硼含量时沉积态 LCD-TC4 成形试样的拉伸测试结果

Table 3 Results of tensile test of deposited LCD-TC4 specimens with different boron mass fractions

Mass fraction of boron /%	Tensile strength /MPa	Yield strength /MPa	Elongation /%	Reduction of area /%
0	1200±10	1135±8	5.1±2.5	17.1±2.6
0.025	1052±5	975±6	11.2±2.7	27.7±2.6
0.050	1136±6	1048±8	11.5±0.2	33.5±5.3
0.075	1147±3	1057±9	10.7±2.8	19.6±4.3
0.100	1158±5	1066±7	10.5±3.7	12.7±5.3
ASTM B381-05	895	825	8	25

从图 4(a)中可以看出:未经硼变质处理的 LCD-TC4 组织的原始 β 晶界清晰,晶内主要由规则

排列的 α 集束构成,是典型的魏氏组织(魏氏组织的特点是塑性和韧性较差);随着硼含量增加,原始柱状晶尺寸减小。从图 4(a)~(c)可以看出:晶内板条 α 相的尺寸减小,与未经硼变质处理的 LCD-TC4 相比,板条 α 相的长宽比减小,出现了较多细小的等轴 α 相;当硼质量分数进一步增大到 0.075% 时,晶内的板条 α 相进一步细化,如图 4(d)所示,并且在晶界处析出了中间相 TiB;当硼质量分数增大到 0.100% 时,TiB 在晶界处大量析出,形成了网状,如图 4(e)所示。结合拉伸测试结果可以得出,当硼质量分数大于 0.075% 时,硼化物沿晶界的大量析出会劣化钛合金的塑性。分析硼细化 LCD-TC4 组织的机理可以得出:在激光成形凝固过程中,硼原子析出并富集在固-液界面处,此处的成分过冷度增大,导致钛合金的熔点减小,从而促进了 TC4 合金自身的形核^[12];此外,硼与钛发生共晶反应生成的中间相 TiB 既可以作为异质形核中心,提高形核率,又可以形成 TiB 晶须,限制 β 晶的无限制生长,从而达到细化晶粒的目的。

对拉伸断口进行观察后发现:当硼质量分数为 0.025%、0.050%、0.075% 时,拉伸断口均为明显的塑性断口;而当硼质量分数为 0.100% 时,断口表现出脆性断裂的特征;当硼质量分数为 0.050% 时,断口呈杯锥状,颈缩程度最大;当硼质量分数为 0.100% 时,断口处无明显的颈缩,为典型的脆性断裂。采用扫描电子显微镜(SEM)观察断口形貌,结

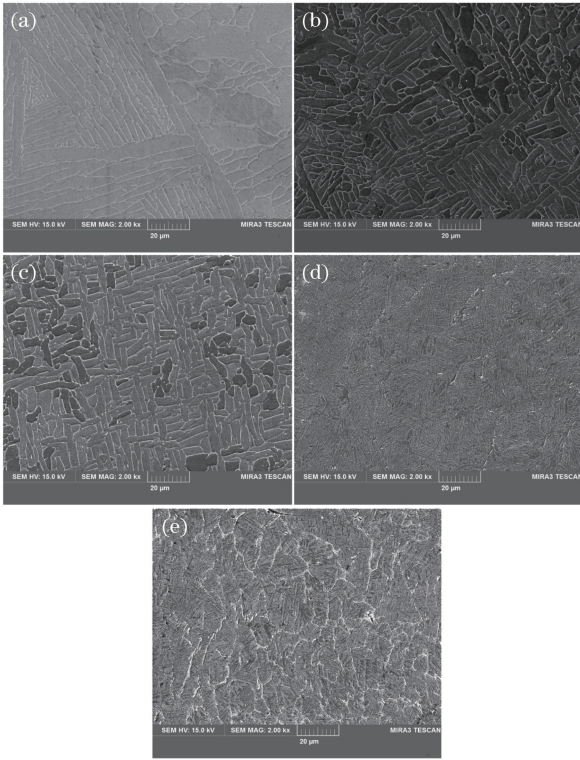


图 4 不同硼含量沉积态 LCD-TC4 成形试样的微观组织。
(a) 0%; (b) 0.025%; (c) 0.050%; (d) 0.075%; (e) 0.100%
Fig. 4 Microstructures of deposited LCD-TC4 with different boron mass fractions. (a) 0; (b) 0.025%; (c) 0.050%; (d) 0.075%; (e) 0.100%

果如图 5 所示,可以发现:当硼质量分数为 0.025%、0.050%、0.075%时,拉伸断口呈韧窝形貌;当硼质量分数为 0.050%时,韧窝呈较深的等轴状;当硼质量分数为 0.025%和 0.075%时,韧窝类型介于剪切韧窝与撕裂韧窝之间。因此,从韧窝类型与塑性之间的关系来看,硼质量分数为 0.050%时塑性最好,这与拉伸测试数据所得到的结论吻合。

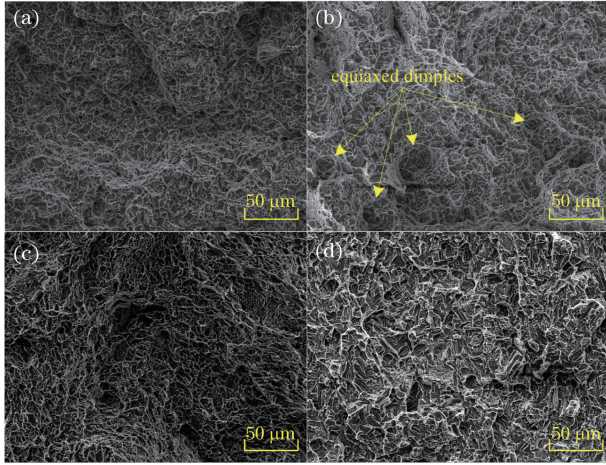


图 5 不同硼含量沉积态 LCD-TC4 拉伸断口的 SEM 形貌。
(a) 0.025%; (b) 0.050%; (c) 0.075%; (d) 0.100%

Fig. 5 SEM morphologies of tensile fractures of deposited LCD-TC4 with different boron mass fractions. (a) 0.025%; (b) 0.050%; (c) 0.075%; (d) 0.100%

3.2 感应加热和热处理对含硼 LCD-TC4 的性能影响

根据实验方案和 3.1 节中得出的结论,采用 LCD 工艺对硼质量分数为 0.050%粉末成形时附加感应加热,成形实验完成后对试样进行固溶-时效热处理。根据梁朝阳等^[13]得到的感应加热对 LCD-TC4 组织的影响规律,设定感应加热温度为 900 °C。此外,陈静等^[8]的研究结果表明,固溶-时效热处理对 LCD-TC4 性能的改善效果最好,本实验采用 950 °C × 1 h/空冷 + 500 °C × 4 h/空冷的固溶-时效热处理方案。采用不同工艺方法制备的 LCD-TC4 成形试样的力学性能如图 6 所示,其中 A 为无感应加热条件下成形的不含硼 LCD-TC4 试样, B 为无感应加热条件下成形的含硼 LCD-TC4 试样, C 为感应加热条件下成形的含硼 LCD-TC4 试样, D 为经过热处理的在无感应加热条件下成形的含硼 LCD-TC4 试样, E 为经过热处理的在感应加热条件下成形的含硼 LCD-TC4 试样。

分析 B、C、D、E 这 4 种试样的力学性能可以看出,通过引入变质元素硼以及感应加热和热处理等工艺, LCD-TC4 试样的综合力学性能均有不同程度

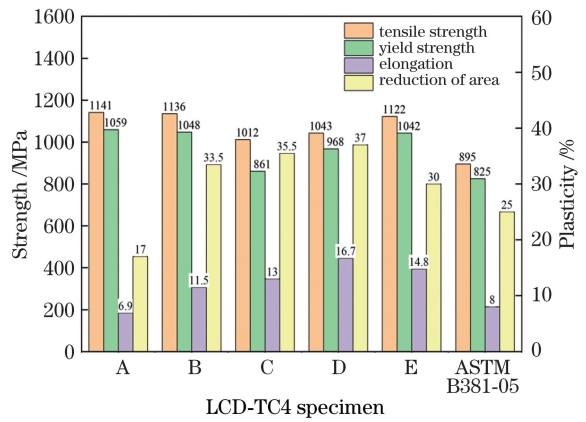


图 6 不同 LCD-TC4 试样的力学性能
Fig. 6 Mechanical properties of different LCD-TC4 specimens

的改善,这 4 种试样的强度和塑性均超过了锻件标准。A 试样的强度虽然达到了锻件标准,但塑性较差,未达到锻件标准。对比 B、C 试样的力学性能可以看出,加入感应加热可使试样强度稍微降低的同时提高塑性,具体如下:屈服强度和抗拉强度分别降低 17.9%和 10.9%,而延伸率和断面收缩率分别提高 13%和 6%。与 B 试样相比, D 试样的力学性能有了很大提升,延伸率提高了 45.2%,断面收缩率提高了 10.4%。与 A 试样相比, D 试样的延伸率提高了 143.1%,断面收缩率提高了 119.4%。通过研究感应加热、热处理、热处理+感应加热这三种工艺方法对含硼 LCD-TC4 试样力学性能的影响可以发现:感应加热和热处理这两种工艺方法均对含硼 LCD-TC4 试样的性能有一定程度的优化,但是热处理+感应加热对含硼 LCD-TC4 试样性能的影响变化不大。从图 6 中还可以看出: A、B、C、D 这 4 种试样的塑性基本呈依次上升的趋势, B、C、D、E 试样的塑性均远高于 A 试样;与 B 试样相比, C 试样的强度下降得最大,但塑性的提升量却不是最大的,而 D 试样在强度下降量较小的情况下得到了最大的塑性提升量。可见,对含硼 LCD-TC4 钛合金试样进行直接热处理能够得到较优的综合力学性能。

对 B、C、D、E 试样的组织形貌进行对比观察,结果如图 7 所示。从图 7 中可以看出这 4 种试样的微观组织均优于具有粗大 β 柱状晶的不含硼 LCD-TC4 的沉积态组织。B 试样的组织是一种介于魏氏组织和网篮组织的中间组织,相对于魏氏组织的板条 α 相,该组织 α 相的尺寸明显减小,且 α 相的长宽比更大,即更趋于等轴化。C 试样沉积过程中附加了感应加热,促进了再结晶过程,使得前一阶段形成

的亚晶界更加充分地完成了向大角度晶界的转变,因此板条 α 相破碎球化的程度更高,形成了等轴 α 相集群,大幅增大了等轴相的含量。但是,等轴相的分布是不均匀的,因此在一定程度上又会抵消等轴相含量增大带来的性能的提高。D试样的组织主要由杂乱的板条 α 相构成,并错落地分布着少量的等轴

α 相,整体上表现为典型的网篮组织,因此塑性相对更好。E试样在沉积过程中附加了感应加热,沉积完成后又进行了热处理(即经历了双重处理),组织中存在较明显的粗大晶界,板条 α 相与等轴 α 相相间分布,且存在较多的 β 相基体,整体来看微观组织接近于双态组织。

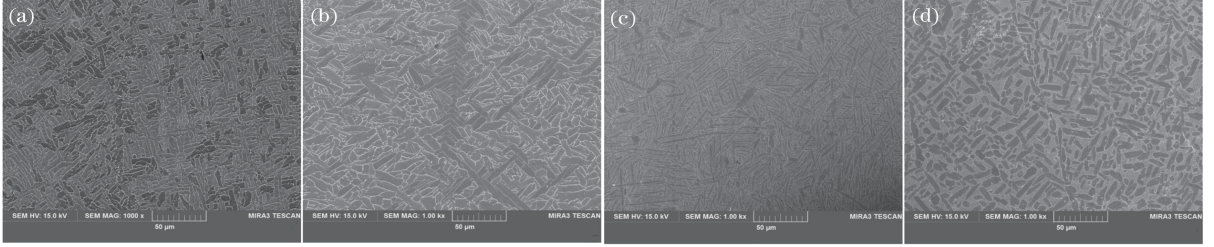


图7 不同工艺条件下制备的LCD-TC4试样的微观组织形貌。(a)含硼无感应加热;(b)含硼感应加热;(c)含硼热处理无感应加热;(d)含硼热处理有感应加热

Fig. 7 Microstructural morphologies of LCD-TC4 specimens prepared under different process methods. (a) Non-induction heating with boron; (b) induction heating with boron; (c) non-induction heating and heat treatment with boron; (d) induction heating and heat treatment with boron

综上所述,无论在何种工艺条件下制备的含硼LCD-TC4试样的强度都优于锻件标准,最优工艺选取的主要依据是对塑性的改善程度,即在保证强度高于锻件标准的同时,塑性提高的幅度最大。经过一系列实验发现,当硼质量分数为0.050%时,采用固溶时效热处理工艺,可以得到微观组织形貌较好且综合力学性能相对更好的LCD-TC4。

3.3 硼对LCD-TC4各向异性的影响

根据实验方案,结合3.2节中的研究结果,进行4组对照实验研究试样的各向异性。4组对照实验如下:1)制备不含硼的沉积态LCD-TC4试样,记为工艺1;2)制备不含硼的沉积态LCD-TC4,并对其进行固溶-时效热处理,记为工艺2;

3)制备硼质量分数为0.050%的沉积态LCD-TC4试样,记为工艺3;4)制备硼质量分数为0.050%的沉积态LCD-TC4试样,并对其进行固溶-时效热处理,记为工艺4。固溶-时效热处理工艺为:950℃×1h/空冷+时效500℃×4h/空冷。为了防止实验的偶然性,每组实验横向(H方向)和竖向(V方向)分别制取3个拉伸试样,拉伸测试数据如表4所示,其中H方向代表沿着垂直于成形方向进行拉伸测试,V方向代表沿成形方向进行拉伸测试。从表4中可以看出,除了不经热处理的含硼LCD-TC4试样在横向的断面收缩率略低于锻件标准外,其他试样在各个方向的性能均高于锻件标准。

表4 热处理前后含硼LCD-TC4试样在各方向的拉伸测试数据

Table 4 Tensile test data of boron-containing LCD-TC4 samples in different directions before and after heat treatment

Process method	Direction	Tensile strength /MPa	Yield strength /MPa	Elongation /%	Reduction of area /%
Process 1	H	1149±7	1050±6	4.30±0.70	13.5±1.2
	V	1063±3	960±4	12.10±0.60	31.7±2.7
Process 2	H	1058±4	953±5	8.80±0.50	22.7±0.9
	V	1035±9	945±7	13.50±1.30	41.5±2.7
Process 3	H	1174±9	1093±8	9.75±0.75	21.5±0.5
	V	1136±6	1048±8	11.50±0.20	33.5±5.3
Process 4	H	1043±4	968±5	16.70±0.80	37.3±2.1
	V	1051±4	951±2	16.00±0.40	36.0±1.0
ASTM B381-05		895	825	≥8.00	≥25.0

图8所示为不同工艺条件下制备的LCD-TC4试样的各向异性。从图8中可以发现:在相同的沉

积条件下,热处理后试样的各向异性均小于未经过热处理的;4种工艺所成形的LCD-TC4试样在强度

上的各向异性均小于 10%，且工艺 2、3、4 所得试样在强度上的各向异性均小于 5%；工艺 1、2、3、4 制备的试样在塑性上的各向异性依次减小；工艺 4 制备的试样在强度和塑性上的各向异性均小于 5%（即在硼质量分数为 0.050% 时进行 LCD 实验，所得成形件经过固溶-时效热处理后的试样不仅拉伸性能最优，而且拉伸性能的各向异性最小，均小于 5%）。图 9 所示为含硼 LCD-TC4 热处理后在横向、竖向的微观组织形貌，可以看出，横、竖两个方向上组织的相似性很高，微观组织均为典型的网篮组织。

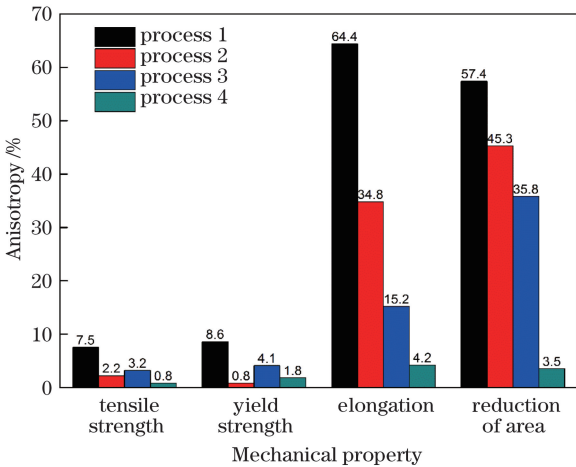


图 8 不同工艺条件制得的 LCD-TC4 的各向异性
Fig. 8 Anisotropy of LCD-TC4 prepared under different process methods

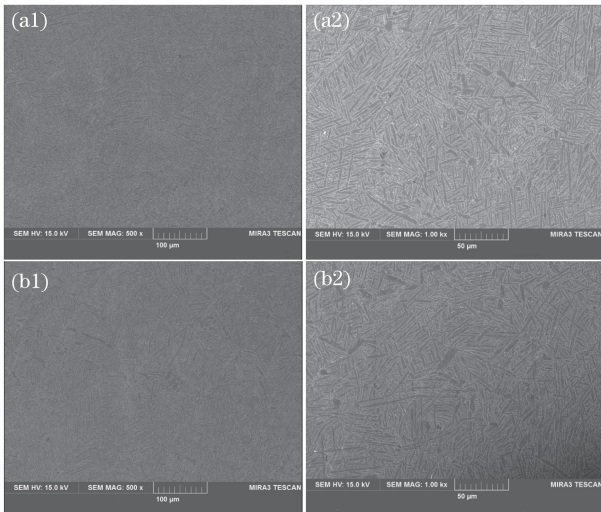


图 9 含硼 LCD-TC4 试样热处理后在横向和竖向的微观组织形貌。(a) 横向；(b) 竖向

Fig. 9 Microstructural morphologies of LCD-TC4 with boron in transverse and longitudinal directions after heat treatment. (a) Horizontal direction; (b) vertical direction

4 结 论

在 TC4 粉体中加入质量分数不大于 0.050% 的硼，可使沉积态 LCD-TC4 试样的力学性能有一定程度的改善，且均高于锻件标准，具体表现为在损失少量强度的同时大幅提高塑性。当硼的质量分数为 0.050% 时，塑性提高的程度最大，但当硼的质量分数大于 0.050% 时，塑性下降明显，断面收缩率远低于锻件标准。

感应加热和热处理均对提高含硼 LCD-TC4 试样的力学性能有一定效果，且热处理相对感应加热的效果更优。对含硼 LCD-TC4 沉积态试样进行热处理后，其在垂直、水平方向的拉伸性能均超过锻件水平，并且各向异性均能控制在 5% 以内。

参 考 文 献

- [1] Zhang A F, Li D C, Liang S D, *et al.* Development of laser additive manufacturing of high-performance metal parts [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2016(22): 16-22.
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(22): 16-22.
- [2] Li D C, He J K, Tian X Y, *et al.* Additive manufacturing: integrated fabrication of macro/microstructures [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(6): 129-135.
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.
- [3] Lu B H, Li D C. Development of the additive manufacturing (3D printing) technology[J]. *Machine Building & Automation*, 2013, 42(4): 1-4.
卢秉恒, 李涤尘. 增材制造(3D 打印)技术发展[J]. *机械制造与自动化*, 2013, 42(4): 1-4.
- [4] Dinda G P, Song L, Mazumder J. Fabrication of Ti-6Al-4V scaffolds by direct metal deposition [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2008, 39(12): 2914-2922.
- [5] Hollander D A, von Walter M, Wirtz T, *et al.* Structural, mechanical and *in vitro* characterization of individually structured Ti-6Al-4V produced by direct laser forming[J]. *Biomaterials*, 2006, 27(7): 955-963.
- [6] Zhu Y Y, Li J, Tian X J, *et al.* Microstructure and mechanical properties of hybrid fabricated Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si titanium alloy by laser additive manufacturing [J]. *Materials Science and*

- Engineering: A, 2014, 607: 427-434.
- [7] Kobryn P A, Semiatin S L. Mechanical properties of laser-deposited Ti-6Al-4V [C]//Solid Freeform Fabrication Proceedings, August 6-8, 2001, University of Texas, Austin. [S.l.: s.n.], 2001: 179-186.
- [8] Chen J, Zhang S Y, Xue L, *et al.* Mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy by laser rapid forming [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(3): 475-479.
陈静, 张霜银, 薛蕾, 等. 激光快速成形 Ti-6Al-4V 合金力学性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(3): 475-479.
- [9] Li J, Lin X, Qian Y H, *et al.* Study on microstructure and property of laser solid forming TC4 titanium alloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(11): 1103010.
李静, 林鑫, 钱远宏, 等. 激光立体成形 TC4 钛合金组织和力学性能研究[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1103010.
- [10] Baufeld B, van der Biest O, Gault R. Additive manufacturing of Ti-6Al-4V components by shaped metal deposition: microstructure and mechanical properties[J]. Materials & Design, 2010, 31(S1): S106-S111.
- [11] Zhu J, Kamiya A, Yamada T, *et al.* Influence of boron addition on microstructure and mechanical properties of dental cast titanium alloys[J]. Materials Science and Engineering: A, 2003, 339(1/2): 53-62.
- [12] Huang L G, Chen Y Y. Research progress of effects of boron on formability and mechanical properties of titanium alloys [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2016, 40(6): 8-13.
黄立国, 陈玉勇. 硼对钛合金成形能力和力学性能影响的研究进展[J]. 机械工程材料, 2016, 40(6): 8-13.
- [13] Liang Z Y, Zhang A F, Li L J, *et al.* Induction heating assisted modifier boron refining of TC4 grains by laser cladding deposition[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(7): 0702001.
梁朝阳, 张安峰, 李丽君, 等. 感应加热辅助变质剂硼细化激光熔覆沉积 TC4 晶粒的研究[J]. 中国激光, 2018, 45(7): 0702001.