

TA2 纯钛激光同轴送丝增材制造组织和性能研究

符成学, 雷小伟, 吕逸帆, 尹艳超, 张文豪, 崔永杰

(中国船舶集团有限公司第七二五研究所, 河南 洛阳 471023)

摘要: 探讨了单向平行、蛇形往复和蛇形正交3种不同路径下利用激光同轴送丝增材制造技术制备的TA2纯钛试件微观组织和力学性能的差异。结果表明, 在合适的工艺参数下, 可以实现TA2纯钛激光同轴送丝增材制造的良好成形, 试件表面呈银白色, 其横、纵向力学性能均可达到GB/T 3621—2022对TA2纯钛板材的要求; 3种路径下制造过程的热输入和散热条件类似, 焊缝微观组织均为锯齿状 α 相。不同增材路径下的焊道熔合形貌不同, 力学性能差异较大, 其中单向平行和蛇形往复路径试件的各向异性较强, 蛇形正交路径试件的各向同性较强; 单向平行路径试件的纵向抗拉强度和屈服强度均最高, 蛇形正交路径试件的横向断后伸长率较高, 塑性较好。

关键词: TA2 纯钛; 激光增材制造; 同轴送丝; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2023)03-001-05

Study on Microstructure and Properties of TA2 Pure Titanium by Laser Coaxial Wire Feeding Additive Manufacturing

Fu Chengxue, Lei Xiaowei, Lv Yifan, Yin Yanchao, Zhang Wenhao, Cui Yongjie

(Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471023, China)

Abstract: The differences in microstructure and mechanical properties of TA2 pure titanium parts produced by laser coaxial wire feeding additive manufacturing under three different trajectories namely unidirectional parallel, serpentine reciprocating and serpentine orthogonal were investigated. The results show that the well forming of TA2 pure titanium laser coaxial wire feeding additive manufacturing be achieved. The surface of the parts are silver white, and the mechanical properties in transverse and longitudinal directions both can meet the requirements of GB/T 3621—2022 for TA2 pure titanium plates. The heat input and dissipation conditions of the manufacturing process under the three tracks are similar, and the microstructure of the weld is serrated α phase. The mechanical properties are variable greatly under different additive manufacturing tracks, because of the different weld bead fusion morphologies. The mechanical properties of unidirectional parallel and serpentine reciprocating track specimens have stronger anisotropy, while the isotropy of serpentine orthogonal track specimen is the strongest. The tensile strength and yield strength of the unidirectional parallel track specimen are the highest in the longitudinal direction, while the transverse elongation after fracture of the serpentine orthogonal track specimen is higher and the plasticity is better.

Key words: TA2 pure titanium; laser additive manufacturing; coaxial wire feeding; microstructure; mechanical properties

增材制造又称3D打印^[1-3], 是基于零部件三维模型实现快速成形的先进制造技术, 在航空航天、船舶工程以及生物医疗等领域有着广阔的应用前景^[4-5]。激光同轴送丝增材制造技术是将丝材从

空激光内部送入, 逐层进行沉积的增材制造技术, 兼具熔丝增材制造成本低、效率高和激光增材制造精度高、质量好的优势, 且过程灵活度高、零件各向异性低, 更具广阔的应用前景^[6]。

目前, 国内外各研究机构已开展了大量关于钛及钛合金激光同轴送丝增材制造技术的研究。重庆大学的 Du^[7]、德国弗朗恩霍夫焊接研究所的 Kelbassa^[8]和法国波尔多大学的 Cazaubon^[9]等人分别对0.4、0.8

收稿日期: 2023-04-01

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2021YFC2800503); 国防基础科研计划项目(JCKY2021206B039)

通信作者: 符成学(1993—), 男, 工程师。

和 1.2 mm TC4 钛合金激光同轴送丝增材制造工艺进行了系统研究, 结果表明激光同轴送丝增材技术可以实现复杂零件的近净成形; 德国劳西茨应用技术大学的 Silze 等人^[10]对 1.0 mm TC4 钛合金激光同轴送丝增材制造试件的组织性能进行了研究, 发现 TC4 钛合金激光同轴送丝增材制造试件的柱状 β 晶粒内部呈现“网篮组织”, 通过延长层间停留时间以及降低层间温度可以减小晶粒尺寸, 改善拉伸性能; 重庆绿色智能技术研究所的 Ding 等人^[11]对 0.4 mm TC4 钛合金激光同轴送丝增材制造工艺进行了研究, 发现在增材制造过程中可通过红外 (IR) 热成像仪对试件内部的缺陷进行预测分析; 西班牙工业研究中心的 Churrucam 等人^[12]对 TC4 钛合金激光同轴送粉和激光同轴送丝增材制造的打印效率、成本和试件质量进行对比分析, 结果表明 2 种增材试件的微观组织类似, 而激光同轴送丝增材制造效率和成本相比激光同轴送粉增材制造有着巨大的优势。

综上所述可以发现, 国内外各机构对钛合金激光同轴送丝增材制造的研究多集中在工艺、组织和热过程分析方面, 对其试件力学性能的研究较少。此外目前的研究多集中在单道多层薄壁件上, 对多层多道增材试件的组织性能缺乏系统研究。与 TC4 钛合金相比, TA2 纯钛具有较高的成本优势, 为此, 以 1.2 mm TA2 纯钛为原料, 对不同路径下激光同轴送丝增材制造试件的组织和性能进行系统研究, 以期为推动钛合金激光同轴送丝增材制造技术在实际工程中的应用提供一定的技术积累。

1 实验

实验材料为 $\phi 1.2$ mm 的 TA2 焊丝, 化学成分如表 1 所示。激光同轴送丝增材制造试验以工业机器人和 L 型变位机作为增材制造系统的运动机构, 以 6 kW 激光器作为热源, 并配备有 150 μm 光纤、激光同轴送丝打印头和推拉式送丝机。试验底板为 50 mm \times 200 mm \times 200 mm 的 TA2 纯钛板, 试验前用钛丝轮清除试板表面氧化膜, 用丙酮清除试板表面油污。增材制造在氩气氛围中进行, 试验参数如表 2 所示。

图 1 为增材制造路径示意图。采用图 1 所示 3 种路径打印规格为 120 mm \times 120 mm \times 20 mm 的 TA2 纯钛试件。其中, 图 1a 为单向平行路径, 每一层的堆积方向一致, 各层的堆积方向也一致; 图 1b 为蛇形往复路径, 每一层采用循环往复的方式堆积, 各

表 1 TA2 焊丝化学成分 (w/%)

Ti	Fe	C	N	H	O
Bal.	0.027	0.0063	0.0047	<0.001	0.10

表 2 增材制造试验参数

Laser power, P/kW	Print speed, $V_1/\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	Wire speed, $V_2/\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	Defocusing amount/mm	Offset /mm
2.5 ~ 3.5	500 ~ 2000	1800 ~ 3200	-5 ~ 5	1.5 ~ 3.0

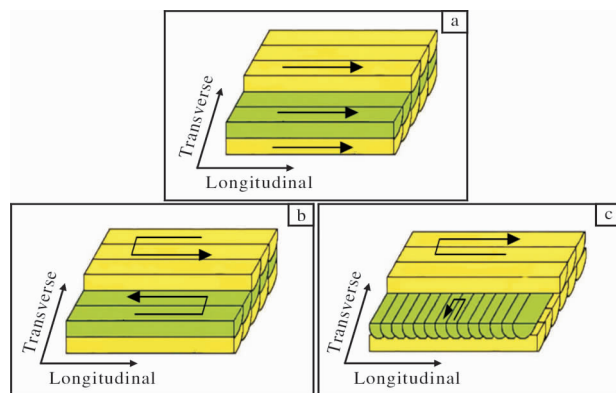


图 1 增材制造路径示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of additive manufacturing tracks: (a) unidirectional parallel; (b) serpentine reciprocating; (c) serpentine orthogonal

层的堆积方向一致; 图 1c 为蛇形正交路径, 每一层采用循环往复的方式堆积, 奇偶层的堆积方向垂直, 层层正交。沿试件横截面切取金相试样, 经砂纸磨光及金刚石研磨膏抛光后, 使用 HF、 HNO_3 、 H_2O 体积比为 2:1:17 的 Kroll 试剂腐蚀 45 s 后立即用清水冲洗干净, 使用 OLYMPUS GX71 金相显微镜观察组织。依照 GB/T 228.1—2021 和 GB/T 229—2020 分别沿试件横向和纵向取标准拉伸试样 (平行段直径为 5 mm) 和 V 型冲击试样 (10 mm \times 55 mm \times 55 mm) 各 3 件, 采用万能材料试验机进行拉伸性能和冲击性能测试。

2 结果与分析

2.1 宏观形貌

图 2 为激光同轴送丝增材制造 TA2 纯钛试件的宏观形貌。从图 2 可以看出, 试件表面光滑均匀, 呈银白色金属光泽, 说明激光功率和送丝速度等工艺参数匹配良好, 打印过程保护效果良好。

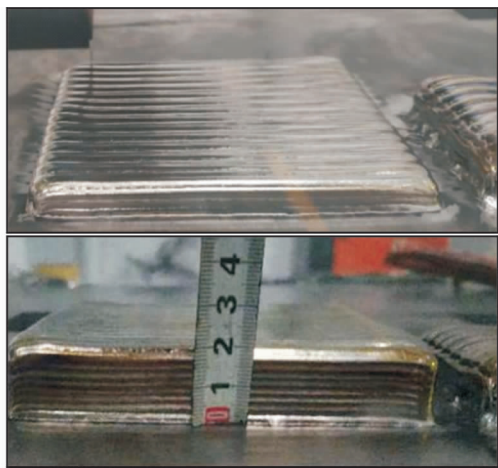


图2 增材制造TA2纯钛试件的宏观形貌

Fig. 2 Macro-morphologies of TA2 pure titanium parts by additive manufacturing

图3为3种增材路径下TA2纯钛试件的焊道熔合形貌。由图3可以看出,对于单向平行路径试件,



图3 不同增材路径下TA2纯钛试件的焊道熔合形貌

Fig. 3 Weld bead fusion morphologies of TA2 pure titanium parts under different additive tracks: (a) unidirectional parallel; (b) serpentine reciprocating; (c) serpentine orthogonal

由于各层间仅高度方向升高相同的距离,奇偶层间的堆积方向以及同一高度奇偶道间的堆积方向均相同,因此各层之间存在较多薄弱的锯齿状熔池边界(图3a)。采用此种路径进行增材制造时,每堆积一道需要熄光停丝一次,返回起始位置进行偏移后再重新堆积,效率较低。对于蛇形往复路径试件,由于每一层奇偶道间的堆积方向相反,奇偶层间的堆积方向也相反,堆积方式较复杂,因此各堆积层间薄弱的锯齿状熔池边界较少(图3b)。采用此种路径进行增材制造时,可在层间温度符合要求的情况下一次堆积多层试样,效率较高。对于蛇形正交路径试件,由于每一层奇偶道间的堆积方向相反,奇偶层间的堆积方向相互垂直,因此熔池边界过渡较其他路径更为平缓,无锯齿状薄弱边界(图3c)。采用此种路径进行增材制造时,也可在层间温度符合要求的情况下一次堆积多层试样,效率与蛇形往复路径相当。

2.2 显微组织

图4为3种增材路径下TA2纯钛试件的金相组织。由图4可以看出,3种增材路径下所获得的试件其组织均为锯齿状 α 相。激光同轴送丝增材制造是焊丝在激光作用下熔化又急速快冷的过程,在熔化过程中发生 $\alpha \rightarrow \beta$ 相转变,在冷却凝固过程中 β 相又转变为 α 相和 α' 相,但由于加热和冷却速度都极快,试件组织转变为不规则的锯齿状 α 相,且晶粒与母材相比较为粗大。3种路径下增材过程的热输入和散热条件类似,因此3组TA2纯钛试件的组织形貌类似。

2.3 力学性能

图5为3种增材路径下TA2纯钛试件的拉伸性能。从图5可以看出,TA2纯钛试件抗拉强度、屈服强度和断后伸长率的最低值分别为425.5 MPa、335.5 MPa和26.0%,均达到了GB/T 3621—2022对TA2纯钛板材拉伸性能的要求。单向平行路径试件的纵向抗拉强度和纵向屈服强度均最高,分别为483.5 MPa和383.5 MPa,蛇形正交路径试件的横向断后伸长率最大,达到了36.0%。此外,单向平行路径和蛇形正交路径试件的拉伸性能各项指标的差值均较大,各向异性较强,蛇形正交路径试件的拉伸性能各项指标的差值均最小,各向同性较强。这主要是由于单向平行路径试件和蛇形往复路径试件在纵向拉伸过程中,载荷方向与沉积焊道方向一致,沉

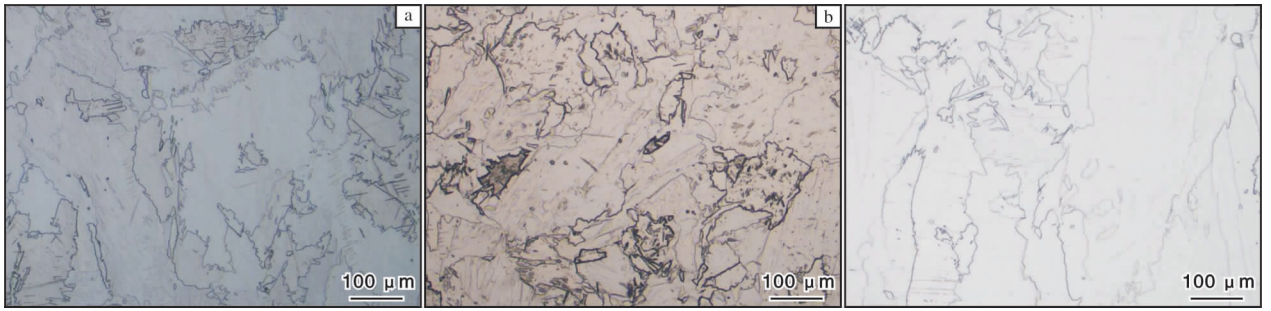


图4 不同增材路径下TA2纯钛试件的显微组织

Fig. 4 Microstructures of TA2 pure titanium parts under different additive tracks: (a) unidirectional parallel; (b) serpentine reciprocating; (c) serpentine orthogonal

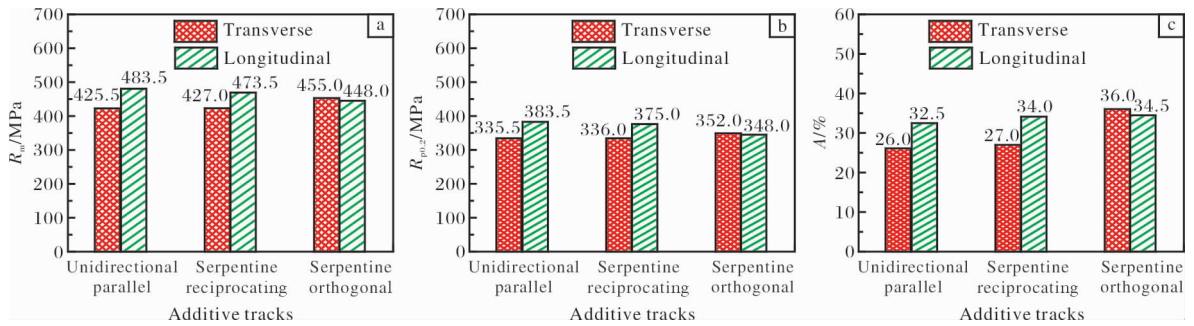


图5 不同增材路径下TA2纯钛试件的拉伸性能

Fig. 5 Tensile properties of TA2 pure titanium parts under different additive tracks: (a) unidirectional parallel; (b) serpentine reciprocating; (c) serpentine orthogonal

积焊道起到了轧制板材中纤维组织的作用，故拉伸性能较好；而横向拉伸时与上述2个方向垂直，各堆积焊道间的熔合线成为了拉伸过程中的薄弱位置，因此各向异性较强。蛇形正交路径试件由于层与层之间沉积方向相互垂直，故横向与纵向组织基本一致，拉伸性能差别不大，各向同性较强。

图6为根据图3抽象出的3种增材路径下TA2纯钛试件的焊道熔合形貌模型。从图6a可以看到，单向平行路径试件由于同一层和不同层相邻焊道的堆积方向一致，有较多3条焊道交于一点的锯齿状薄弱区域；而图6b蛇形往复路径试件由于每一层相邻焊道和相邻层不同焊道的堆积方向均不相同，多为

2条焊道交于一点，锯齿状薄弱区域较少；图6c蛇形正交路径试件由于相邻层焊道堆积方向垂直，焊道熔合边界最为平缓，无锯齿状薄弱区域。增材制造试件的塑性变形能力主要由晶粒滑移和焊道边界滑移共同决定^[13]。3种不同增材路径下试件内部的显微组织相似，均为锯齿状 α 相，因而塑性变形能力主要由焊道边界滑移决定。焊道边界平缓，有利于降低应力集中，提高试件的塑性变形能力。因此，蛇形正交路径试件的断后延伸率较高，且由于横向和纵向的焊道熔合形貌相同，各向同性也较强。

图7为不同增材路径下TA2纯钛试件的冲击性能。从图7可以看出，与拉伸性能类似，单向平行

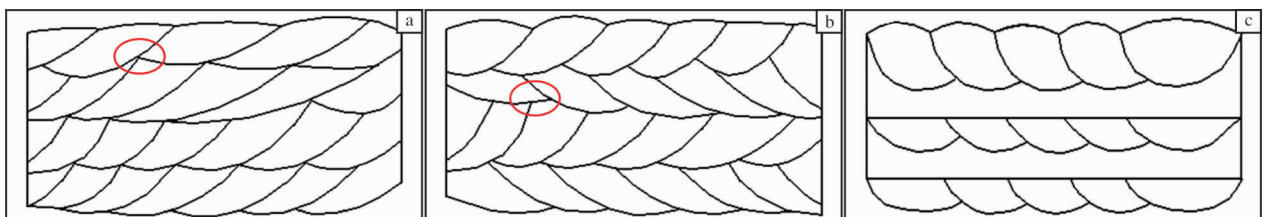


图6 不同增材路径下TA2纯钛试件的焊道熔合形貌模型

Fig. 6 Models of weld bead fusion morphologies of TA2 pure titanium parts under different additive tracks: (a) unidirectional parallel; (b) serpentine reciprocating; (c) serpentine orthogonal

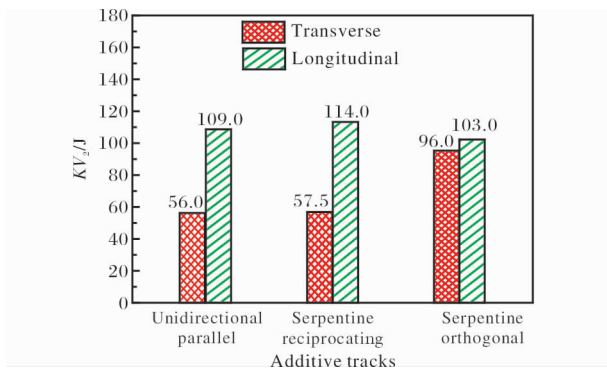


图7 不同增材路径下TA2纯钛试件的冲击性能

Fig. 7 Impact performance of TA2 pure titanium parts under different additive tracks

路径和蛇形往复路径试件在横、纵向的冲击功差值较大,而蛇形正交路径试件在横、纵向的冲击功差值较小。这也是由于不同路径下试件的焊道熔合形貌存在明显差异而引起的。

3 结论

(1) 在合适的工艺参数下,可以实现 1.2 mm TA2 纯钛丝材的激光同轴送丝增材制造。所制备的 TA2 纯钛试件表面光滑平整,呈银白色,在横、纵两个方向上的力学性能均能达到 GB/T 3621—2022 对 TA2 纯钛板材的要求。

(2) 由于 3 种路径下增材过程的热输入和散热条件类似,焊缝微观组织均为锯齿状 α 相。不同的增材路径下,由于堆积层与层间、同一层相邻的堆积焊道之间堆积方向存在差异,使得不同路径增材试件的焊道熔合形貌迥异。

(3) TA2 纯钛试件的力学性能主要与增材路径形成的焊道熔合形貌有关,其中单向平行路径和蛇形往复路径试件的力学性能各向异性较强,蛇形正交路径试件的各向同性较强。

(4) 单向平行路径试件的纵向抗拉强度和屈服强度均最高,分别为 483.5、383.5 MPa。这主要是由于纵向拉伸过程中,载荷方向与沉积焊道方向一致,沉积焊道起到了轧制板材纤维组织的作用。蛇形正交路径试件在横、纵向的断后伸长率均较高,分别为 36.0% 和 34.5%,这主要是因为蛇形正交路径试件焊道边界平缓,应力集中较低,塑性变形能力较强。

参考文献 References

[1] 王兆毅,吕云卓,陈秉智,等. 增材制造吸能结构研究

进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(6): 2302-2315.

[2] Ding D H, Shen C, Pan Z X, et al. Towards an automated robotic arc-welding-based additive manufacturing system from CAD to finished part[J]. Computer-Aided Design, 2016, 73: 66-75.

[3] 彭徽,陶申,陈博,等. 电子束选区熔化(SEBM)增材制造高温合金研究进展[J]. 中国材料进展, 2022, (4): 252-267+274.

[4] 张帅锋,吕逸帆,魏正英,等. 热处理对 CMT 电弧熔丝增材制造 Ti-6Al-3Nb-2Zr-1Mo 合金显微组织和力学性能的影响[J]. 钛工业进展, 2022, 39(3): 11-16.

[5] 郭艳华,戴国庆,孙中刚,等. 激光增材制造钛合金冶金组织特征及其调控方法研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(12): 4733-4744.

[6] 陈源,姜梦,陈曦,等. 光纤同轴激光增材制造技术研究进展[J]. 材料科学与工艺, 2022, 30(2): 16-27.

[7] Du F R, Zhu J Q, Ding X P, et al. Dimensional characteristics of Ti-6Al-4V thin-walled parts prepared by wire-based multi-laser additive manufacturing in vacuum[J]. Rapid Prototyping Journal, 2019, 25(5): 849-856.

[8] Kelbassa J, Gasser A, Bremer J, et al. Equipment and process windows for laser metal deposition with coaxial wire feeding[J]. Journal of Laser Applications, 2019, 31(2): 022320.

[9] Cazaubon V, Akle A A, Fischer X. A parametric study of additive manufacturing process: TA6V laser wire metal deposition[C]//Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing III: Proceedings of the International Joint Conference on Mechanics, Design Engineering & Advanced Manufacturing. Berlin Heidelberg: Springer, 2021: 15-20.

[10] Silze F, Schnick M, Sizova I, et al. Laser metal deposition of Ti-6Al-4V with a direct diode laser set-up and coaxial material feed[J]. Procedia Manufacturing, 2020, 47: 1154-1158.

[11] Ding X P, Li H M, Wang G Y, et al. Application of infrared thermography for laser metal-wire additive manufacturing in vacuum[J]. Infrared Physics & Technology, 2017, 81: 166-169.

[12] Churrucam M M, Arrizabalaga J L, Heredia I, et al. Comparative study of laser metal deposition (LMD) of coaxial wire and power in the manufacture of Ti-6Al-4V structures[J]. Dyna, 2020, 95: 376-379.

[13] 刘黎明,贺雅净,李宗玉,等. 不同路径下 316 不锈钢电弧增材组织和性能[J]. 焊接学报, 2020, 41(12): 13-19.