第 47 卷 第 6 期 焊 接 学 报 Vol. 47(6):100 − 107
2026 年 6 月 TRANSACTIONS OF THE CHINA WELDING INSTITUTION June 2026

引文格式: 孙清洁, 康克新, 余红武, 等. Ti60 合金磁场辅助 TIG 电弧熔粉增材制造工艺[J]. 焊接学报, 2026, 47(6): 100 − 107.
SUN Qingjie, KANG Kexin, YU Hongwu, *et al*. Magnetic field-assisted TIG arc powder fusion additive manufacturing process of Ti60 alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2026, 47(6): 100 − 107.

Ti60 合金磁场辅助 TIG 电弧熔粉增材制造工艺

孙清洁[1,2], 康克新[1,2], 余红武[1,2], 李文渊[3], 刘建荣[3], 孙琪[1,2], 刘一搏[1,2]

(1. 哈尔滨工业大学, 材料结构精密焊接与连接全国重点实验室, 哈尔滨, 150001; 2. 哈尔滨工业大学 (威海), 山东省特种焊接技术重点实验室, 威海, 264209; 3. 中国科学院金属研究所, 师昌绪先进材料创新中心, 沈阳, 110016)

摘要: 为了解决 Ti60 高温钛合金增材制造致密度低、制丝困难的问题, 采用磁场辅助 TIG 电弧熔粉增材制造方法, 并开展相关工艺研究. 结果表明, 常规 TIG 电弧熔粉增材制造过程中, 粉末在电弧力的作用下易飞离基板, 产生严重飞溅. 而通过施加横向磁场可改变电弧形貌及其前端电弧力, 显著抑制飞溅产生. 此外, 探究了电流对焊道宏观成形的影响, 发现随着电流的增大, 焊道的熔宽和熔深显著增大, 且均匀性明显改善, 球化金属大幅减少. 借助高速摄像机拍摄该方法独特的粉末熔化及熔滴过渡过程, 粉末经历了不同于丝材的熔滴形成—熔滴长大—熔滴过渡过程. 增材制造的 Ti60 合金墙体试样具有较高强度和优异塑性, 横向抗拉强度平均值为 1047.0 MPa, 断后伸长率为 14.1%; 纵向抗拉强度为 1036.9 MPa, 断后伸长率为 15.4%. 其力学性能优良主要归因于细小的 $\alpha+\beta$ 网篮组织及较小的 α 板条长径比.

创新点: (1) 通过施加磁场调控电弧特性, 减少 TIG 电弧熔粉增材制造过程的粉末飞溅.
(2) 探究了电流对焊道宏观成形的影响, 以及特殊的粉末熔化过程.
(3) 通过后续焊道热处理促使马氏体分解, 获得强度和塑性优异的 Ti60 合金.

关键词: Ti60 合金; 电弧熔粉增材制造; 磁场辅助; 成形工艺; 高塑性
中图分类号: TG 444 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20250611001

Magnetic field-assisted TIG arc powder fusion additive manufacturing process of Ti60 alloy

SUN Qingjie[1,2], KANG Kexin[1,2], YU Hongwu[1,2], LI Wenyuan[3], LIU Jianrong[3], SUN Qi[1,2], LIU Yibo[1,2]

(1. State Key Laboratory of Precision Welding & Joining of Materials and Structures, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001, China; 2. Shandong Provincial Key Laboratory of Special Welding Technology, Harbin Institute of Technology (Weihai), Weihai, 264209, China; 3. Shi-Changxu Innovation Center for Advanced Materials, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, 110016, China)

Abstract: To solve the problems of low density and difficulty in wire fabrication in the additive manufacturing of Ti60 high-temperature titanium alloy, the magnetic field-assisted TIG arc powder fusion additive manufacturing method was adopted, and related process studies were conducted. The results show that during the conventional TIG arc powder fusion additive manufacturing process, the powder easily flies off the substrate under the action of arc force, producing severe spatter. However, applying a transverse magnetic field changes the arc morphology and its leading arc force, significantly suppressing spatter generation. In addition, the effect of current on the macroscopic forming of the weld bead is investigated. It is found that with the increase of current, the melting width and penetration depth of the weld bead increase significantly; the uniformity of the weld bead

收稿日期: 2025 − 06 − 11; **录用日期:** 2025 − 08 − 04
基金项目: 国家科技重大专项项目 (J2019-VII-0004-0144); 国家自然科学基金资助项目 (52275320, 52175299)

improves obviously, and the spheroidized metal decreases substantially. The unique powder melting and droplet transfer processes of this method are captured with a high-speed camera. The powder undergoes a process of droplet formation, droplet growth, and droplet transfer different from that of wire. The additively manufactured Ti60 alloy wall specimens exhibit high strength and excellent plasticity. The average transverse tensile strength is 1 047.0 MPa, and the elongation after fracture is 14.1%; the longitudinal tensile strength is 1 036.9 MPa, and the elongation after fracture is 15.4%. Their excellent mechanical properties are mainly attributed to the fine $\alpha + \beta$ basketweave microstructure and the small aspect ratio of α laths.

Highlights: (1) By applying a magnetic field to regulate arc characteristics, powder spatter during the TIG arc powder fusion additive manufacturing process was reduced.

(2) The effect of current on the macroscopic forming of the weld bead and the unique powder melting process were investigated.

(3) The Ti60 alloy with excellent strength and plasticity was obtained by subsequent weld bead heat treatment to promote martensite decomposition.

Key words: Ti60 alloy; arc powder fusion additive manufacturing; magnetic field assistance; forming process; high ductility

0　序言

随着航空航天工程的快速发展, 其关键部件材料的服役性能面临愈发严峻的挑战[1-2]. Ti60 合金是国内自主研发的 600 ℃ 高温钛合金, 具有高比强度、优异的常温和高温性能, 是制造航空发动机叶盘、叶片等部件的理想材料[3-4]. 目前, 压气机叶盘等高温钛合金部件往往采用整体锻造和机加工的方式生产, 造成严重的材料浪费[5].

增材制造技术具有无需模具、近净成形等特点, 与传统制造方法相比, 能够减少材料浪费、降低生产成本, 已经成为航空航天高性能金属部件制造和修复的关键技术[6-7]. 其中, 电弧增材制造由电弧焊接技术发展而来, 具有很高的沉积效率和较低的生产成本, 在制造大尺寸部件方面展现出明显优势[8-9]. 此外, 相对于激光等高能束热源, 电弧的能量密度较低, 熔池的深宽比较小, 不易产生工艺性气孔. 在高致密度、高疲劳性能材料的制造方面, 极具发展前景[1,6,10]. 但是, 目前电弧增材制造的原材料形式仅局限于丝材. 随着航空航天材料的发展, 很多高性能材料难以拉拔成尺寸均匀的丝材. 相对而言, 粉末形式的原材料更容易制备, 并且能够更加灵活地改变元素成分[11-12].

将电弧热源与粉末原材料搭配, 可以实现材料成分的灵活调控, 并有望制造高致密度、高性能的部件. 然而, 由于电弧力的作用, 粉末易被吹飞产生飞溅, 很难实现稳定的熔化和沉积[13]. 电弧等离子体主要由带电粒子组成, 这些粒子在磁场中受洛伦兹力作用, 进而改变原有运动轨迹, 最终影响电弧的力热分布特性[14-15]. 国内外学者在电弧焊接/增材制造过程中施加磁场, 研究其对焊接过程的影响, 发现磁场是调控电弧、熔滴过渡和焊道成形的有效手段[14,16]; 合理的磁场形式还能够抑制柱状晶的形成, 细化材料的微观组织[17-18].

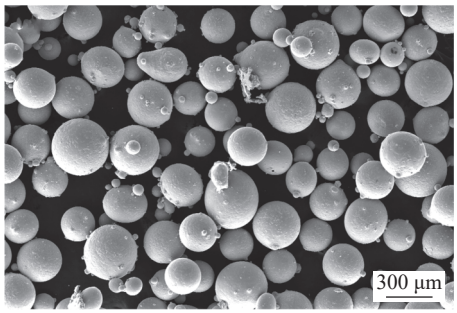
文中在钨极惰性气体保护焊 (tungsten inert gas welding, TIG) 电弧熔粉增材制造过程中施加横向静磁场, 期望通过改变电弧特性, 稳定焊接过程. 以 Ti60 合金为例, 研究了电流对成形尺寸的影响规律, 以及试样的微观组织和力学性能.

1　试验方法

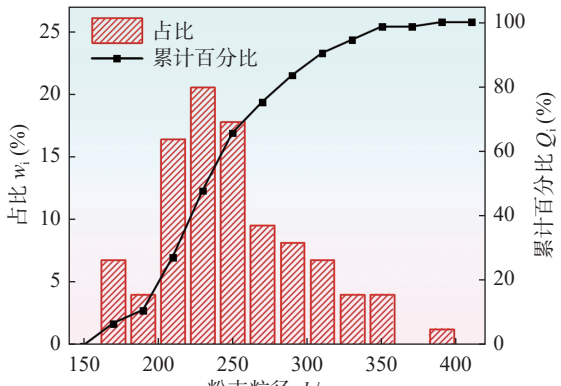
文中采用的增材制造基板为 100 mm × 40 mm × 10 mm 的 TC4 钛合金. 沉积金属原材料为旋转电极法制备的 Ti60 合金粉末, 其形貌和粒径统计如图 1 所示. 筛选出粒径大于 150 μm 的粉末用于电弧熔粉增材制造, 一方面粉末的质量较大, 不容易被吹飞; 另一方面, 该粒径在激光定向能量沉积 (53 ~ 150 μm) 和激光粉末床熔融技术 (15 ~ 53 μm) 的理想尺寸范围之外, 能够降低材料成本[19]. TC4 基板和 Ti60 粉末的合金元素成分如表 1 所示.

磁场辅助 TIG 电弧熔粉增材制造方法原理和装置如图 2 所示. 首先, 在基板表面均匀地铺一层粉末, TIG 电弧由粉末层上方扫过. 随着电弧的加热和离开, 粉末经历熔化和凝固过程, 形成沉积层. 不断重复上述的铺粉和电弧加热过程, 进行材料的逐层沉积叠加, 实现目标部件的增材制造.

磁场辅助 TIG 电弧熔粉增材制造装置主要由



(a) 粉末形貌



(b) 粒径统计

图 1 Ti60 合金粉末形貌和粒径统计

Fig. 1 Morphology and particle size statistics of Ti60 alloy powder. (a) morphology of powder; (b) particle size statistics

表 1 基板及粉末材料的化学成分 (质量分数，%)

Table 1 Chemical composition of substrate and powder materials

材料	Al	V	Sn	Zr	Mo	Si	Nb	Ta	Ti
TC4基板	6.2	4.1	—	—	—	—	—	—	余量
Ti60粉末	6.0	—	4.0	3.5	0.5	0.4	0.4	0.9	余量

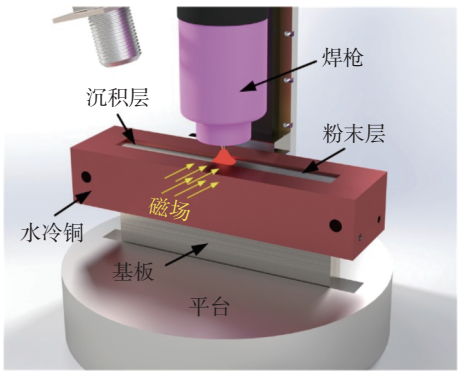


图 2 磁场辅助 TIG 电弧熔粉增材制造方法及装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of magnetic field assisted TIG arc powder melting additive manufacturing method and device

TIG 焊枪、送粉装置、励磁装置、水冷铜夹具和平台等主要部分组成. 在外加横向静磁场的作用下, 电弧特性及其对粉末的作用效果能够发生改变. 此外, 在基板外围装夹水冷铜, 一方面通过加快熔融金属的冷却速率, 改善合金的微观组织和力学性能; 另一方面减小基板的变形和残余应力. 采用高速摄像机对增材制造过程中的粉末运动和熔化行为进行拍摄. 研究中主要采用的工艺参数如表 2 所示. 焊接电源的电流输出模式为方波脉冲模式.

如图 3 所示截取试样, 对磁场辅助 TIG 电弧熔粉增材制造的 Ti60 合金墙体试样的力学性能和微观组织进行表征. 采用万能力学试验机进行常温拉伸测试. 采用 SiC 砂纸对金相试样的横截面进行研磨, 用 SiO_2 悬浊液抛光, 然后配制 Kroll 试剂 (1 mL HF、6 mL HNO_3 和 43 mL H_2O) 进行金相腐蚀, 借助扫描电子显微镜进行组织表征.

表 2 主要工艺参数

Table 2 Key process paraments

序号	平均电流 I/A	基值峰值比 K(%)	峰值电流占空比 D(%)	电流脉冲频率 f/Hz	磁感应强度 B/mT	焊接速度 v/(cm·min^{-1})	层高 h/mm
1	80	60	50	5	0, 2	13	0.5
2	95	60	50	5	0, 2	13	0.5
3	110	60	50	5	0, 2	13	0.5
4	125	60	50	5	0, 2	13	0.5
5	140	60	50	5	0, 2	13	0.5

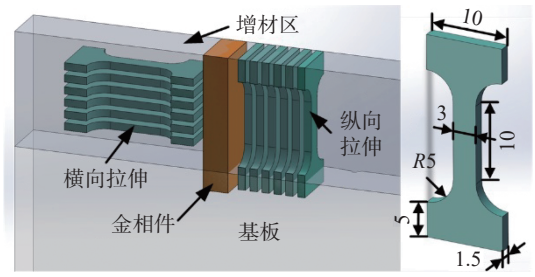


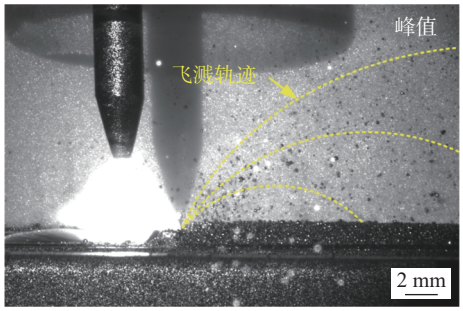
图 3　试样尺寸及截取位置示意图 (mm)

Fig. 3　Schematic diagram of specimen dimensions and extraction locations

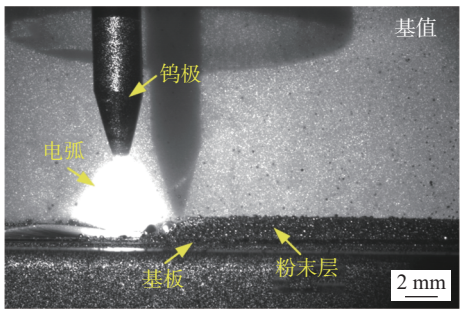
2　结果与讨论

2.1　粉末飞溅现象及磁场辅助抑制作用

借助高速摄像机拍摄了常规电弧熔粉增材制造过程中的粉末飞溅现象，如图 4 所示. 在峰值电流时间，电弧的前端与粉末直接接触. 大量的粉末在电弧力的作用下脱离粉末层，向前方飞出，形成飞溅. 峰值电流时间，电弧的宽度较大，且随着电弧向前移动，粉末飞溅现象持续发生. 当转变到基值电流时间，电弧的宽度显著减小，电弧前端接触不到未发生熔化的粉末层，故在此时间段几乎不产生粉末飞溅. 飞溅现象因脉冲工艺具有明显的周期性.



(a) 峰值时间

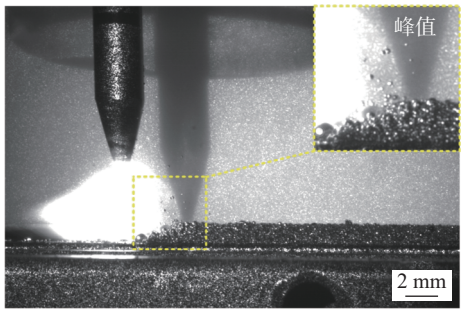


(b) 基值时间

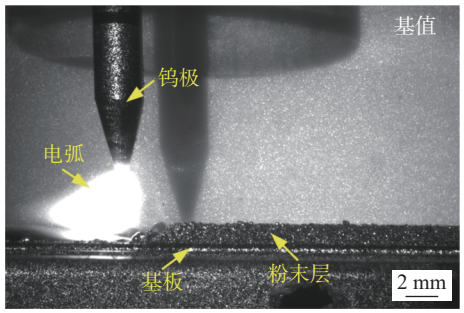
图 4　常规电弧模式下的粉末飞溅现象

Fig. 4　Powder spattering phenomenon in conventional arc mode. (a) peak time; (b) base time

借助高速摄像机拍摄了 2 mT 磁场下的粉末飞溅现象，如图 5 所示. 施加磁感应强度为 2 mT 的横向磁场后，电弧形貌发生明显变化，由对称的钟罩形转变为向后侧偏转，电弧前侧的宽度明显减小，后侧的宽度显著增加. 电弧前端等离子流的方向由前下方转变为正下方，产生飞溅的粉末数量明显减少，飞溅距离显著减小.



(a) 峰值时间



(b) 基值时间

图 5　2 mT 磁场下的粉末飞溅现象

Fig. 5　Powder spattering phenomenon under 2 mT magnetic field. (a) peak time; (b) base time

2.2　成形工艺研究及粉末熔化行为分析

通过单道沉积试验，研究了电流对磁场辅助 TIG 电弧熔粉增材制造宏观成形的影响，其表面和截面形貌如图 6 所示. 在小电流条件下，焊道宽度很小，且非常不均匀. 在焊道周围存在大量断续分布的球化金属，显著增加了多道沉积时产生未熔合缺陷的风险. 此时只有中心焊道处的金属实现了有效沉积. 随着电流的增加，焊道的形貌逐渐变得美观，宽度大幅增加，均匀性明显改善，球化金属显著减少.

进一步定量研究了电流对焊道熔宽、熔深和余高等截面成形尺寸的影响，结果如图 7 所示. 随着电流的提高，熔宽大幅增加. 当电流达到 110 A 后，熔宽的增加幅度显著减小. 熔深随着电流的提高基本呈线性增加趋势. 熔宽和熔深的增加主要归因于对粉末和基板金属热输入的增大. 余高比较稳定，受电流影响较小. 这是因为，在电流较小时，焊道内的有效沉积金属较少，余高较小；电流较大时，金属的铺展宽度增加，也会导致余高减小.

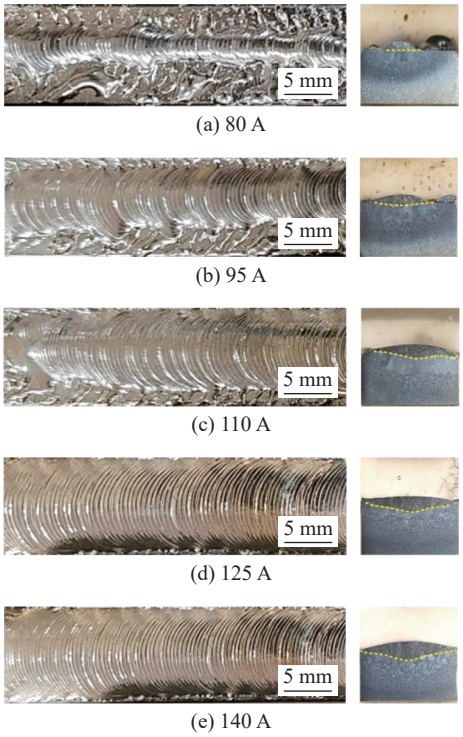


图 6 不同电流下的单道焊道宏观形貌

Fig. 6 Macro morphology of single weld bead under different currents. (a) 80 A; (b) 95 A; (c) 110 A; (d) 125 A; (e) 140 A

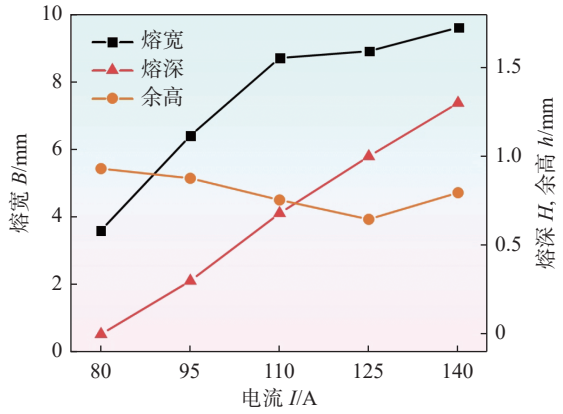


图 7 电流对截面成形尺寸的影响

Fig. 7 Effect of current on cross-section forming dimensions

为了探究这种现象的成因，采用高速摄像机拍摄了平均电流 125 A，磁感应强度 2 mT 条件下的粉末熔化行为，结果如图 8 所示. 电弧前端的低温区首先与粉末接触并逐渐向前移动，这部分粉末在加热下发生熔化并聚集成“熔滴”. 这一现象与激光增材制造中的“球化”现象类似[20]. 随着电弧的持续加热和电弧更高温度区域的到达，更多的粉末发生熔化，汇入熔滴中使其长大. 当相邻的两个熔滴长大到足以互相接触时，会发生合并，形成一个新的、更大的熔滴. 熔滴不一定呈规则的球状，有些会呈椭球形或其他不规则形状. 随着电弧高温区及其下方的熔池继续向前移动，熔滴与熔池前端接触. 在表面张力作用下，熔滴中的液态金属被“吸入”熔池中，完成“过渡”. 熔池在吸入熔滴的液态金属后，体积瞬间增加，熔池发生明显的震荡. 在 5 Hz 的低频脉冲条件下，上述熔滴形成、长大和过渡的过程主要发生在峰值电流时段. 基值电流时段电弧的能量较低，尺寸较小，只伴随着很小程度的熔滴形成和

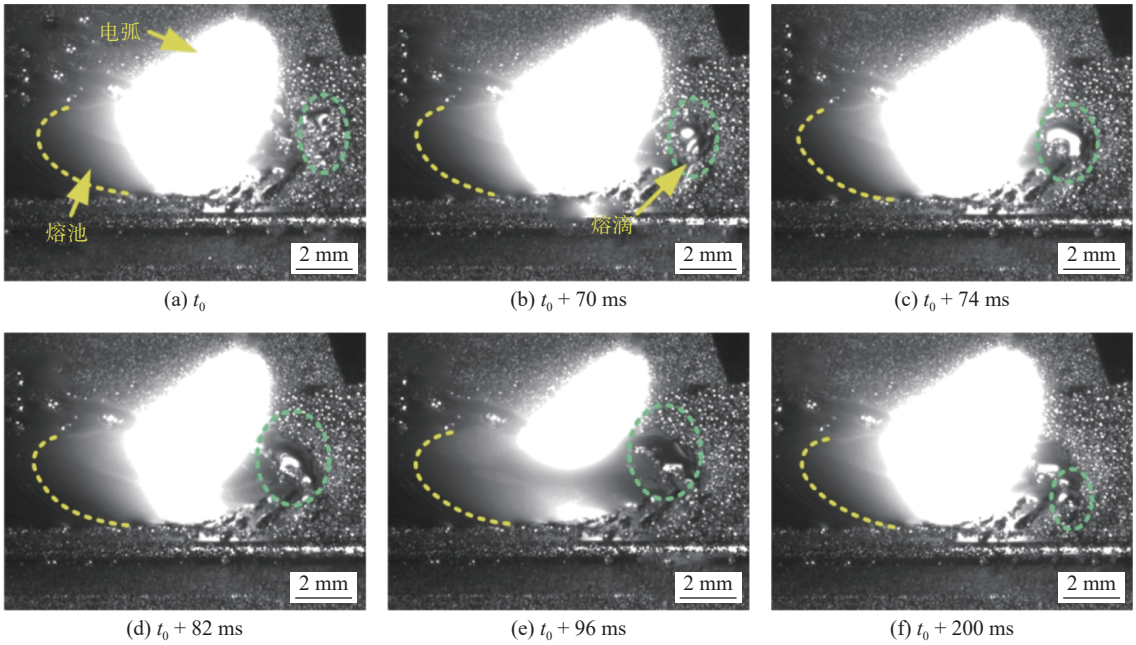


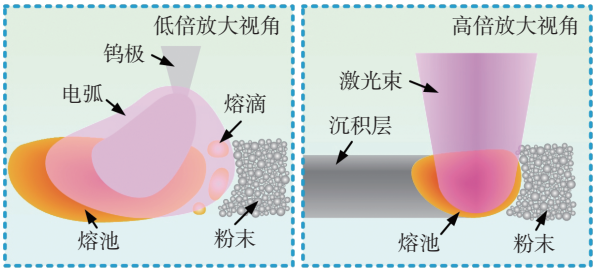
图 8 125 A 平均电流及 2 mT 磁场下粉末熔化行为

Fig. 8 Powder melting behavior under 125 A average current and 2 mT magnetic field. (a) t_0; (b) t_0 + 70 ms; (c) t_0 + 74 ms; (d) t_0 + 82 ms; (e) t_0 + 96 ms; (f) t_0 + 200 ms

长大. 总之，粉末在电弧加热下，经历形成熔滴—熔滴长大—熔滴过渡等多个阶段实现沉积，并在低频脉冲工艺下呈现周期性变化特征.

此外，在小电流条件下，熔池的宽度较小. 两侧的粉末只受到电弧低温区的加热，经历熔滴的形成和长大，但无法过渡到熔池中，最终在凝固后保留图 6(a) 所示的形状.

磁场辅助 TIG 电弧熔粉增材制造与激光粉末床熔融过程中的粉末熔化行为示意图如图 9 所示. 由于电弧热源的能量密度较低，且由中心向周边呈缓降分布，粉末在其作用下呈现出固态粉末、熔滴和熔池 3 种状态. 而激光束的能量密度极高，通常只存在固态粉末和熔池两种状态，因此在沉积过程中不发生熔滴过渡现象.



(a) 磁场辅助 TIG 电弧熔粉增材制造　　(b) 激光粉末床熔融

图 9　粉末熔化行为对比

Fig. 9　Comparison of powder melting behavior. (a) magnetic field assisted TIG arc powder fusion additive manufacturing; (b) laser powder bed fusion

2.3　微观组织及力学性能分析

采用平均电流 125 A，磁感应强度 2 mT，单层双道的工艺参数制造了 Ti60 合金墙体试样，其宏观形貌如图 10 所示. 试样成形良好，由于水冷铜的约束，试样侧壁平直，且表面存在一层未熔化的粉末.

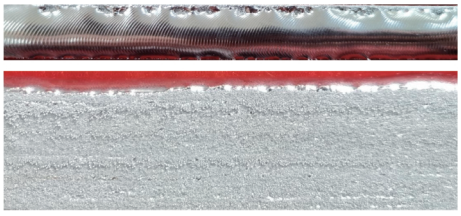


图 10　墙体试样宏观形貌

Fig. 10　Macro morphology of wall specimen

截取横向和纵向试样进行常温拉伸性能测试，并统计其抗拉强度和断后伸长率的平均值，结果如图 11 所示. 横向抗拉强度为 1 047.0 MPa，断后伸长率为 14.1%. 纵向抗拉强度为 1 036.9 MPa，断后伸长率为 15.4%. 与横向试样相比，纵向试样强度轻微降低，塑性小幅提高. 总体而言，试样具有较高的抗拉强度和优异的塑性.

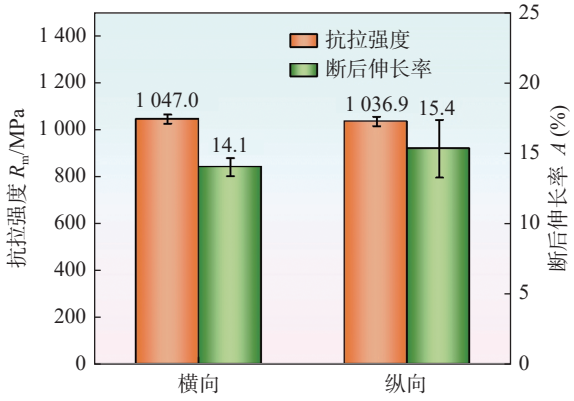


图 11　常温拉伸性能统计

Fig. 11　Statistics of tensile properties at room temperature

单层单道沉积试样沉积区的微观组织如图 12 所示. 由于冷却速率较快，且合金中 β 稳定元素含量很少，室温下为网篮状分布的马氏体组织.

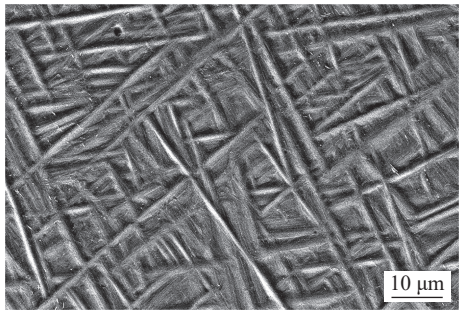


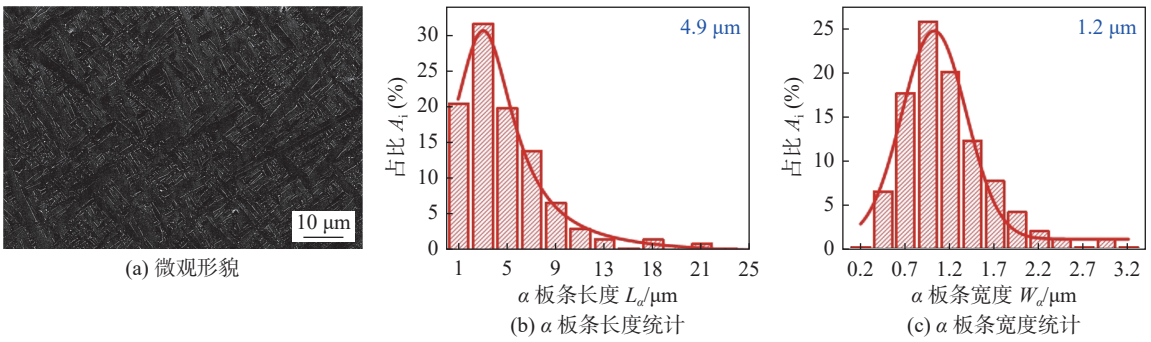
图 12　单道沉积试样的微观组织

Fig. 12　Microstructure of single pass deposition specimen

在后续焊道的热处理作用下，马氏体组织发生分解，转变为 α 板条 + 板条间 β 相的网篮组织[21]. 不同区域的受热温度和热循环次数不同，转变后的组织也不同，将其分为基体区和层带区. 基体区微观组织如图 13 所示，α 板条呈互相交错的网篮状分布. 少量细长的 β 相分布在 α 板条的边界处，β 相的面积占比仅有 3.9%. α 板条的平均长度为 4.3 μm，平均宽度为 1.2 μm.

层带区的微观组织如图 14 所示，β 相含量明显增加，达到 10.1%. 且 β 相在 α 板条边界处连续分布，能够完整地勾勒出 α 板条的形状. 此处 α 板条的平均长度为 4.9 μm，平均宽度为 1.5 μm. 与基体区相比，板条长度和宽度有所增大.

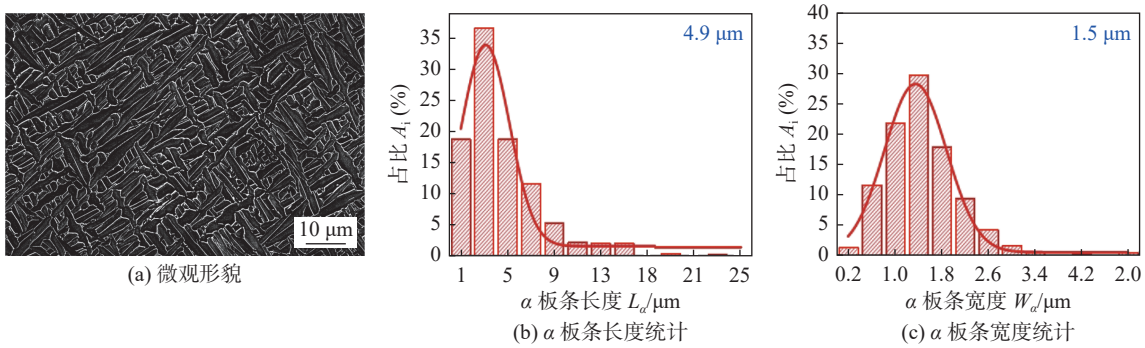
横向和纵向拉伸试样的断口形貌如图 15 所示，均呈现韧窝特征，表明其断裂模式为微孔聚集



(a) 微观形貌 (b) α 板条长度统计 (c) α 板条宽度统计

图 13 基体区的微观组织

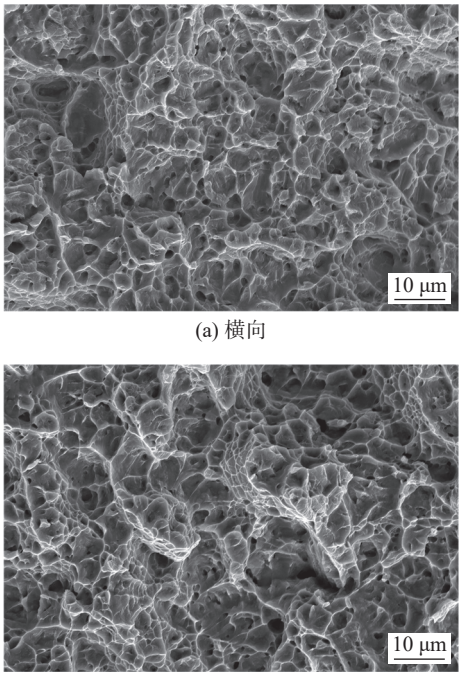
Fig. 13 Microstructure of the matrix region. (a) microscopic morphology; (b) statistics of α lath length; (c) statistics of α lath width



(a) 微观形貌 (b) α 板条长度统计 (c) α 板条宽度统计

图 14 层带区的微观组织

Fig. 14 Microstructure of the banded region. (a) microscopic morphology; (b) statistics of α lath length; (c) statistics of α lath width



(a) 横向

(b) 纵向

图 15 拉伸试样断口形貌

Fig. 15 Fracture morphology of tensile specimens. (a) transverse; (b) longitudinal

型断裂，合金具有良好的塑性. 合金的优异塑性主要归因于马氏体组织的转变. 转变后形成的 α + β 网篮组织，有利于提高材料的协调变形能力，获得优异的塑性.

3 结论

(1) 在 TIG 电弧熔粉增材制造过程中，施加横向磁场，能够使电弧发生偏转，改变电弧力的分布，显著抑制粉末飞溅行为.

(2) 通过改变电流可以有效调节焊道的宏观成形，显著增大熔宽和熔深，减少球化金属并使焊道变得更加均匀.

(3) 在电弧作用下，粉末呈现出独特的熔化过程，经历了熔滴形成、熔滴长大和熔滴过渡阶段.

(4) 多道沉积的墙体试样微观组织为：具有较小尺寸和长径比的 α 板条 + 少量板条间 β 相的网篮组织. 使合金在具有较高抗拉强度的基础上，兼具优异的韧性.

参考文献

[1] LIU G Z, ZHAO Q Y, JIA W J, *et al*. Damage tolerance perform-

ance of high strength and toughness titanium alloys formed by additive manufacturing in aerospace: A review[J]. Review of Materials Research, 2025, 1(1): 100003.

[2] 周亦人, 沈自才, 齐振一, 等. 中国航天科技发展对高性能材料的需求 [J]. 材料工程, 2021, 49(11): 41 − 50.
ZHOU Yiren, SHEN Zicai, QI Zhenyi, *et al*. Demand for high performance materials in development of China's aerospace science and technology[J]. Journal of Materials Engineering, 2021, 49(11): 41 − 50.

[3] 黄琪, 高旭, 刘栋, 等. 激光增材修复 Ti60 钛合金显微组织及力学性能 [J]. 稀有金属材料与工程, 2024, 53(4): 1058 − 1064.
HUANG Qi, GAO Xu, LIU Dong, *et al*. Microstructure and mechanical properties of laser additive repaired Ti60 titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2024, 53(4): 1058 − 1064.

[4] WEN T H, FU R, XIAO S H, *et al*. Temperature-dependent performance and constitutive modeling of additively manufactured Ti600 alloy[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2025, 34: 776 − 784.

[5] BLAKEY-MILNER B, GRADL P, SNEDDEN G, *et al*. Metal additive manufacturing in aerospace: A review[J]. Materials & Design, 2021, 209: 110008.

[6] 王梦璐, 李占明, 孙晓峰, 等. Inconel 718 合金激光增材修复关键工艺优化 [J]. 焊接学报, 2024, 45(6): 30 − 38.
WANG Menglu, LI Zhanming, SUN Xiaofeng, *et al*. Optimization of key technology of Inconel 718 alloy by laser additive repair[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2024, 45(6): 30 − 38.

[7] 舒宗富, 黄春平, 张耀祖, 等. 激光熔覆 Ti60 合金的工艺参数优化及组织性能研究 [J]. 中国激光, 2024, 51(12): 94 − 104.
SHU Zongfu, HUANG Chunping, ZHANG Yaozu, *et al*. Process parameter optimization and microstructure and property investigation in laser cladding of Ti60 alloy.[J]. Chinese Journal of Lasers, 2024, 51(12): 94 − 104.

[8] WANG Y H, CHEN X Z, KONOVALOV S V. Additive manufacturing based on welding arc: A low-cost method[J]. Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2017, 11(6): 1317 − 1328.

[9] SRIVASTAVA M, RATHEE S, TIWARI A, *et al*. Wire arc additive manufacturing of metals: A review on processes, materials and their behaviour[J]. Materials Chemistry and Physics, 2023, 294: 126988.

[10] SANAEI N, FATEMI A. Defects in additive manufactured metals and their effect on fatigue performance: A state-of-the-art review[J]. Progress in Materials Science, 2021, 117: 100724.

[11] LI W L, CHEN Y, CHENG M, *et al*. Effect of magnetic head shape on processing of titanium alloy wire by magnetic abrasive finishing[J]. Materials, 2020, 13(6): 1401.

[12] MENG Y F, YU Q X, WU X, *et al*. Oscillating laser-arc hybrid additive manufacturing of aluminum alloy thin-wall based on synchronous wire-powder feeding[J]. Thin-Walled Structures, 2025, 206: 112665.

[13] KANG K X, LIU Y B, REN H S, *et al*. A novel magnetic field assisted powder arc additive manufacturing for Ti60 titanium alloy: Method, microstructure and mechanical properties[J]. Additive Manufacturing, 2024, 83: 104065.

[14] 秦子濠, 李湘文, 郑学军, 等. 磁控焊缝跟踪传感器非对称纵向磁场下的焊缝识别 [J]. 焊接学报, 2023, 44(5): 84 − 94,134.
QIN Zihao, LI Xiangwen, ZHENG Xuejun, *et al*. Seam recognition by magnetic control seam tracking sensor under asymmetric longitudinal magnetic field[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2023, 44(5): 84 − 94,134.

[15] XIAO L, FAN D, HUANG J K. Tungsten cathode-arc plasma-weld pool interaction in the magnetically rotated or deflected gas tungsten arc welding configuration[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 32: 127 − 137.

[16] SUN Q J, LI J Z, LIU Y B, *et al*. Arc characteristics and droplet transfer process in CMT welding with a magnetic field[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 32: 48 − 56.

[17] JIE J C, YUE S P, LIU J, *et al*. Revealing the mechanisms for the nucleation and formation of equiaxed grains in commercial purity aluminum by fluid-solid coupling induced by a pulsed magnetic field[J]. Acta Materialia, 2021, 208: 116747.

[18] ZHAO R X, CHEN C Y, SHUAI S S, *et al*. Enhanced mechanical properties of Ti6Al4V alloy fabricated by laser additive manufacturing under static magnetic field[J]. Materials Research Letters, 2022, 10(8): 530 − 538.

[19] REN P Y, OUYANG Y, MU J R, *et al*. Metal powder atomization preparation, modification, and reuse for additive manufacturing: A review[J]. Progress in Materials Science, 2025, 152: 101449.

[20] ZöLLER C, ADAMS N A, ADAMI S. Numerical investigation of balling defects in laser-based powder bed fusion of metals with Inconel 718[J]. Additive Manufacturing, 2023, 73: 103658.

[21] XU W, BRANDT M, SUN S, *et al*. Additive manufacturing of strong and ductile Ti-6Al-4V by selective laser melting via in situ martensite decomposition[J]. Acta Materialia, 2015, 85: 74 − 84.

作者简介: 孙清洁，博士，教授；主要研究方向为高效智能化焊接方法及装备；Email：qjsun@hit.edu.cn.
刘一搏 (通信作者)，博士，教授；主要研究方向为轻-异质金属连接冶金；Email：ybliu0701@hit.edu.cn.

（编辑：　赵佳欣）