

高强 Al-Mg 合金钨极氩弧双丝增材 制造工艺与组织性能

何 杰, 冯曰海, 张 林, 占 彬

(南京理工大学, 南京 210094)

摘 要: 针对钨极氩弧增材制造铝合金构件效率低的不足, 采用二根同质铝镁合金丝材同步送进同一熔池的增材制造方式, 从而达到高效率高质量制造高强铝镁合金构件的目的. 试验中分别采用单填丝和双填丝钨极氩弧工艺, 分别制造了直壁体试样, 对比试验研究了二种工艺增材制造试样在宏观尺寸、显微组织和力学性能上的差异. 结果表明, 在相同的工艺参数条件下, 双填丝增材制造工艺熔敷速率是单填丝工艺的 2.08 倍, 试样的晶粒明显更加细小; 所制造试样的抗拉强度达到铸造 7A52 铝镁合金的 71%, 纵向抗拉强度相对单填丝提高了 7%, 纵向断后伸长率提高了 5%.

关键词: 双填丝; 钨极氩弧; 高强铝镁合金; 增材制造

中图分类号: TG 455 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.2019400191

0 序 言

高强铝镁合金具有良好的抗蚀性, 较高的强度, 低的密度, 被广泛应用于航空航天、轨道交通、国防军工等领域. 丝材电弧增材制造铝合金构件是近几年发展的一门新技术, 也是大型铝合金构件增材制造研究的热点. 但由于电弧熔化丝材过程中, 极易产生气孔和裂纹, 使得制造高性能的铝合金构件难度较高. CMT 工艺与 GMA 进行铝合金增材制造时, 熔敷效率虽然高, 但是有气孔存在^[1-3]. 同时 GMA 的高热输入会造成堆覆构件中残余应力增加而导致构件变形^[4-6], 目前这些问题仍然是难以解决. 而相对于丝材熔化极电弧铝合金增材制造, 采用钨极氩弧具有气孔倾向小、热输入小、质量高的优点, 但其熔敷效率低是明显不足.

针对高强铝合金丝材钨极氩弧增材制造工艺 (gas tungsten arc additive manufacturing process, GTAM Process) 熔敷效率低的不足, 采用了一种在增材堆敷时, 使用双填丝工艺来提高熔敷效率的方法. 双填丝是指在丝材电弧堆覆过程中, 两个送丝嘴同时将二种同种或者异种丝材送进同一电弧进

行熔化. 国外有学者使用双填丝的电弧增材制造技术堆覆出了有 25%Al 富 Fe 的 Fe-Al 间金属化合物和 Fe-Al 梯度材料^[7-8]. 目前双填丝堆覆方式主要被学者用于异种材料的混合堆覆, 而针对熔敷增材效率提升的研究相对较少涉及. 同时铝镁高强铝合金的电弧增材制造的工艺基础性研究相对较少, 对其性能和组织的变化特征变化规律研究也不多.

文中采用“双填丝 + 钨极氩弧”增材制造工艺, 以 ER 5356 铝镁合金丝材为熔化丝材, 钨极氩弧作为加热热源, 单道多层制造方式, 增材制造高强铝镁合金直壁体试样. 并使用相同的工艺条件, 传统的单填丝 GTAM 工艺, 制备了高强铝镁合金直壁体试样. 然后对比分析二种工艺获得试验的成形尺寸、力学性能与微观组织方面的变化规律, 试图掌握双填丝 GTAM 增材制造工艺在制造高强铝合金方面的特点.

1 试验方法

双填丝 GTAM 系统主要包括焊机、送丝机和机器人三部分构成. 焊机采用福尼斯 Magic Wave 3000 交直流钨极氩弧焊机提供电流和电压, 送丝机采用二路独立送丝机构、双送丝夹持机构与氩弧焊枪固定为一体. 双填丝机构见图 1 所示, 氩弧焊枪和双送丝机构被固定在弧焊机械手臂的末端. 机器人协调控制焊机和双送丝机构, 按照预定程序, 机

机器人控制电弧的引燃与送丝的启停,按照预设路径和层数进行直壁体的增材制造。



图 1 双填丝机构照片

Fig. 1 Photograph of double-wire feeding equipment

试验材料选用 ER 5356 铝镁合金丝材,直径为 1.2 mm,基板选用 Al 6061 铝合金,丝材和基板成分如表 1。增材试样前,先使用砂轮机对基板表面进行机械抛光,去除基本表面的氧化层,然后用丙酮擦洗,去除油脂等有机物。试验时,采用双向增材堆覆的方式,堆覆时钨极距离工件 5 mm,钨棒直径为 4.8 mm,交流频率 70 Hz,送进丝材与垂直钨极的夹角为 60°,二根丝材之间的夹角为 15°,保护气体为 99.99% 的氩气。双填丝的二根丝材的送丝速度与单填丝丝材送丝速度相同,均为 2.0 m/min。增材工艺参数如表 2。为了对比分析双填丝工艺和单填丝工艺对于堆覆试样性能的影响,单填丝堆敷层数为 70 层,双填丝堆覆层数均设定为 40 层。

表 1 基板和丝材化学成分 (质量分数, %)

Table 1 Chemical compositions of substrate and wire

材料	Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Zn	Mg	其它
ER5356	0.25	0.25	0.1	0.05~0.2	0.05~0.2	0.1	4.5~5.5	Al
Al 6061	0.4~0.8	0.7	0.15	0.15	0.15~0.4	0.25	0.8~1.2	Al

表 2 堆覆工艺参数

Table 2 Depositing process conditions

工艺	堆覆电流 I/A	堆覆电压 U/V	堆覆速度 $v_f/(cm \cdot min^{-1})$	保护气流量 $q/(L \cdot min^{-1})$	填丝速度 $v_{sl}/(m \cdot min^{-1})$
单填丝	100	23.3	40	18	2.0
双填丝	100	25.3	40	18	2.0

力学性能测试和显微组织测试试样均采用线切割从直壁体切取。铝镁合金金相试样分别经过 240 号~800 号金相砂纸打磨,再分别使用 W5, W1 的金相研磨膏在抛光机上抛光,并用 2.5% 的氟硼酸水溶液电解腐蚀 2~5 min,最后在偏光模式下用光学显微镜观察铝镁合金金相显微组织。显微硬度测试采用型号为 HVS1000-Z 显微硬度计,加载载荷为 500 g,测试点加载时间为 10 s,相邻硬度测试点距离为 0.5 mm。图 2 为拉伸试样在直壁体上的取样示意图,其中纵向与横向各取 3 个。图 3 为直壁体拉伸试样尺寸,厚度为 3.0 mm。图 4 为切

割拉伸试样照片。

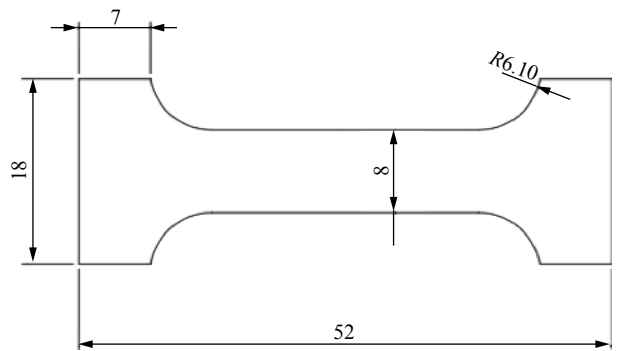


图 3 拉伸试样制备尺寸 (mm)

Fig. 3 Dimensions drawing of tensile specimen

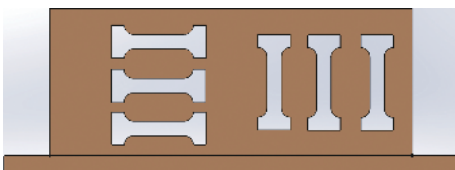


图 2 拉伸试样切割示意图

Fig. 2 Scheme of tensile specimen manufacturing



图 4 拉伸试样照片

Fig. 4 Photograph of tensile specimens

2 试验结果及分析

2.1 直壁体外观成形尺寸分析

图 5 为单填丝与双填丝直壁体的平均单层高度与宽度. 从图中可以看出, 在该工艺条件下, 双填丝方式试样平均层宽为 7.4 mm, 单填丝方式试样的平均层宽 7.3 mm; 双丝直壁体的平均层高为 2.3 mm, 单填丝试样的平均层高为 1.2 mm. 结果表明, 双填丝工艺与单填丝工艺相比, 平均层高提高明显, 约为 1.92 倍, 而平均层宽变化较少. 主要原因在双填丝时, 在相同的工艺参数下, 同等时间内送丝量是单填丝的二倍, 使得铝合金的熔敷量明显增加, 然而由于铝合金的散热很快, 因此金属溶液来不及铺展就迅速凝固, 从而使得熔池的宽度增加不明显, 而双填丝 GTAM 工艺增材直壁体的平均层高相比于单填丝 GTAM 工艺材明显增加.

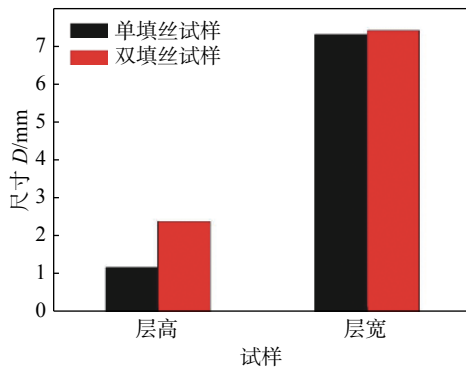
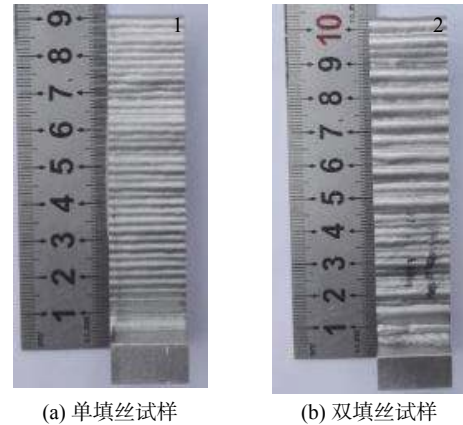


图 5 单填丝与双填丝成型尺寸测量结果
Fig. 5 Dimensional measurement results of single-wire feeding and double-wire feeding

图 6 为单填丝和双填丝增材制造直壁体的局部外观形貌, 1 号为单填丝制造试样, 2 号为双填丝制造试样. 从图中可以看出, 采用双填丝堆覆 40 层的高度比单填丝堆覆 70 层的高度还要高, 单填丝的成形更加均匀, 成形均良好. 图 7 为直壁体横截面形貌, 图中可以看出所制造的高强铝镁合金试样横截面没有发现明显的气孔, 也没有可见的裂纹、夹杂等缺陷. 由于堆覆速度相同, 因此只需要对比单填丝和双填丝直壁体的横截面积, 就可以获得二种工艺实际的堆覆效率对比. 试样的横截面形状如图 6 所示, 其中设横截面积为 S , 横截面高度为 h , 横截面宽度为 w . 计算 S 发现, 双丝横截面积与单丝横截面积比值为 2.08, 表示实际双填丝 GTAM 工艺的有效堆覆效率是单填丝 GTAM 工艺的 2.08 倍.



(a) 单填丝试样 (b) 双填丝试样

图 6 堆覆直壁外观

Fig. 6 Appearance of deposited wall

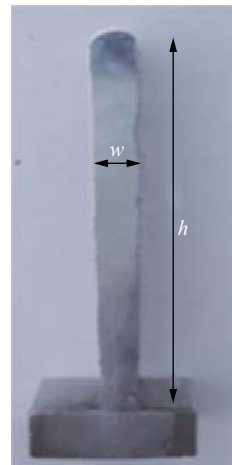
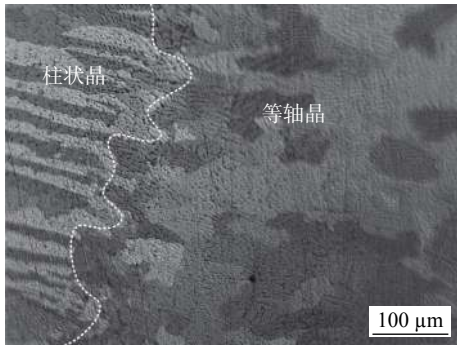


图 7 直壁体横截面形貌

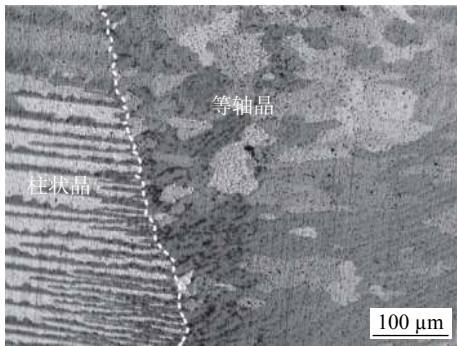
Fig. 7 Photograph of cross section of deposited wall

2.2 显微组织特征对比分析

图 8 为单填丝 GTAM 工艺和双填丝 GTAM 工艺堆覆直壁体的显微组织形貌. 从图中可以看出, 单填丝和双填丝直壁体单层分为依附前层生长的柱状晶, 柱状晶逐渐生长到堆覆层中部形成等轴晶区. 对比图 8a 和图 8b 二种工艺的显微组织, 明显可以观察到在相同的放大倍数下, 双填丝直壁体组织更为细密, 等轴晶区的晶粒明显细小. 在上下二层的交界处, 单填丝制造的层间处, 初生的 α 相铝具有很强的枝晶生长倾向, 存在明显的树枝晶. 而图 8b 的双填丝显微组织, 在层间的明显树枝晶生长不充分, 存在大龄的柱状晶, 同时使得等轴晶区的晶粒更加细小均匀. 而由于双填丝方式相对单填丝, 电弧电压虽然稍微有所增加, 但同样的堆覆电流需要同时熔化二根丝材, 熔敷金属的成倍增加, 使得相同体积熔敷金属的加热热量明显减少, 从而使得双丝直壁体熔



(a) 单填丝试样显微组织形貌



(b) 双填丝试样显微组织形貌

图 8 单填丝和双填丝试样的显微组织

Fig. 8 Microstructures of single-wire and double-wire GTAM processed samples

敷金属的冷却速度远远大于单填丝, 因此双丝组织更细小, 枝晶更少.

2.3 拉伸性能测试

图 9 为单填丝和双填丝力学性能测试柱状图. AL7A52 铝合金的名义抗拉强度为 400 MPa, 而直壁体的纵向平均最大抗拉强度为 284 MPa, 达到了 AL7A52 铝镁合金的 71%. 从图 9a 可以看出, 双填丝直壁体的纵向最大抗拉强度增加了 22 MPa, 同时横向平均最大抗拉强度增加了 23 MPa. 从图 8 组织分析观察到, 双填丝直壁体中晶粒相比于单填丝直壁体更细, 使得晶界面越多, 晶界越曲折, 因而采用双填丝 GTAM 工艺获得的试样抗拉强度增加. 图 9b 为直壁体试样的断后伸长率, 双填丝直壁体在横向与纵向的断后伸长率均优于单丝直壁体, 纵向断后伸长率提高了 5%, 同时横向断后伸长率提高了 1%, 说明双丝直壁体的断后伸长率相对于单丝直壁体的断后伸长率稍微有所增加. 图 10 为单填丝和双填丝断口形貌. 从图中明显可以发现, 二种方式断口均存在大量大小不一的韧窝, 断裂方式均为等轴断裂, 二种工艺制造的直壁体试样的断口

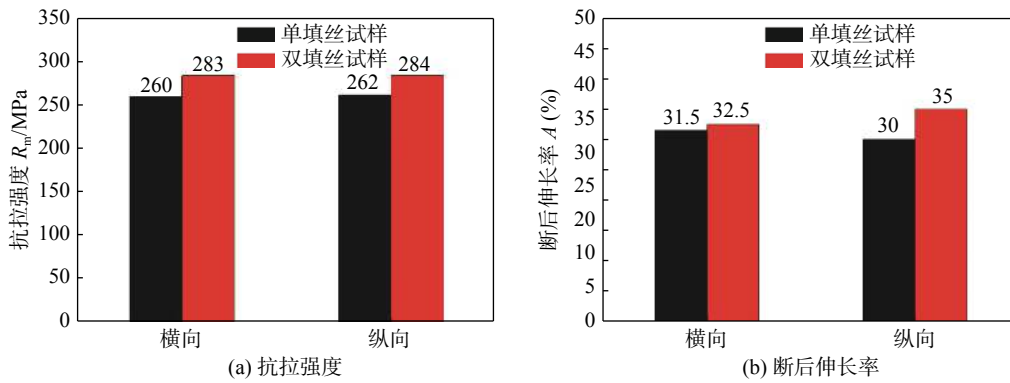
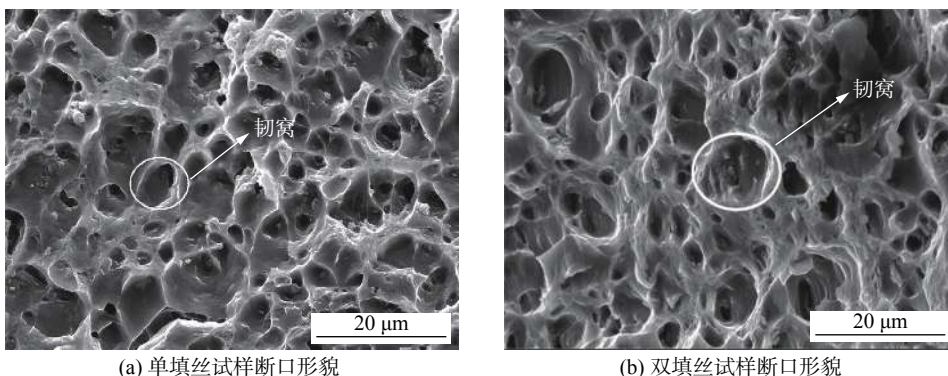


图 9 单填丝和双填丝试样拉伸性能

Fig. 9 Tensile properties of single-wire and double-wire GTAM processed samples



(a) 单填丝试样断口形貌

(b) 双填丝试样断口形貌

图 10 单填丝和双填丝试样拉伸断口形貌 (SEM)

Fig. 10 Tensile fracture morphology (SEM) of single-wire and double-wire GTAM processed samples

形貌没有明显的差别。

2.4 显微硬度分布特征比较分析

图 11 所示为单填丝和双填丝试样的显微硬度测试曲线。二种工艺制造的直壁体底部与顶部的硬度值都比中间稳定区高,是因为底部和顶部的散热速度均比中间稳定区快,因而体现显微硬度更高。单填丝直壁体硬度最高值位于堆覆层的底部,为 87 HV0.5;最低在中间稳定区,为 71 HV0.5;中间稳定区域硬度值主要围绕 77 HV0.5 上下波动,平均硬度值 75 HV0.5。双填丝直壁体显微硬度与单填丝直壁体硬度相同的分布趋势,显微硬度的最高值同样位于增材堆敷层的底部,为 77 HV0.5;最低值位于中间稳定区,为 68 HV0.5;中间稳定区域主要围绕 74 HV0.5 上下范围波动,平均硬度为 73 HV0.5。单填丝直壁体的平均硬度值只比双填丝直壁体大 2 HV0.5,可知双填丝 GTAM 工艺对试样的显微硬度影响较小。

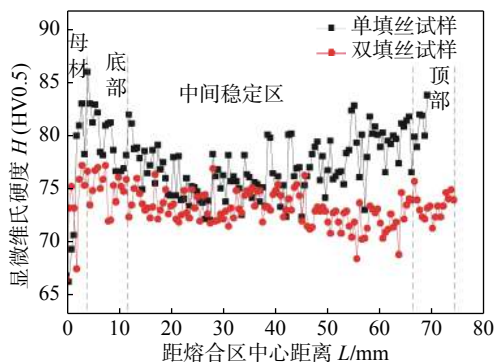


图 11 单填丝和双填丝试样显微硬度

Fig. 11 Micro hardness comparison of single-wire and double-wire GTAM processed samples

3 结 论

(1) 采用双填丝钨极氩弧增材制造工艺,成功制造了高强铝镁合金试样,试样内部无气孔、夹杂等缺陷,最大抗拉强度达到铸造 AL 7A52 的 71%。

(2) 钨极氩弧增材制造高强铝镁合金试样时,双填丝工艺堆覆效率是单填丝工艺堆覆效率的 2.08 倍。

(3) 双填丝工艺堆覆出的直壁体构件相比于单填丝工艺在纵向最大抗拉强度增加了 22 MPa,横向增加了 23 MPa。纵向断后伸长率提高了 5%,横向断后伸长率提高了 1%。钨极氩弧双填丝堆覆对

试样的显微硬度的分布影响较小。

参考文献:

- [1] 从保强,丁佳洛. CMT 工艺对 Al-Cu 合金电弧增材制造气孔的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(12): 3149 – 3153.
Cong Baoqiang, Ding Jialuo. Influence of CMT process on porosity of wire arc additive manufactured Al-Cu alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(12): 3149 – 3153.
- [2] Kang B Y, Prasad Y K D V, Kang M J, *et al.* Characteristics of alternate supply of shielding gases in aluminum GMA welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(10): 4716 – 4721.
- [3] 聂云鹏,张培磊,庄乔乔,等. 4043 铝合金冷金属过渡薄壁构件电弧快速成形[J]. 焊接学报, 2018, 39(11): 58 – 62.
Nie Yunpeng, Zhang Peilei, Zhuang Qiaoqiao, *et al.* 4043 aluminum alloy thin-walled parts arc rapid prototyping with cold metal transfer[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(11): 58 – 62.
- [4] Ding J, Colegrove P, Mehnen J, *et al.* Thermo-mechanical analysis of wire and arc additive layer manufacturing process on large multi-layer parts[J]. Computational Materials Science, 2011, 50(12): 3315 – 3322.
- [5] 柏久阳,王计辉,林三宝,等. 铝合金电弧增材制造焊道宽度尺寸预测[J]. 焊接学报, 2015, 36(9): 87 – 90.
Bai Jiuyang, Wang Jihui, Lin Sanbao, *et al.* Width prediction of aluminium alloy weld additively manufacture by TIG arc[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(9): 87 – 90.
- [6] 苗玉刚,曾 阳,王 腾,等. 基于 BC-MIG 焊的铝/钢异种金属增材制造工艺[J]. 焊接学报, 2015, 36(7): 5 – 8.
Miao Yugang, Zeng Yang, Wang Teng, *et al.* Additive manufacturing process of aluminum/steel dissimilar metal metal based on BC-MIG welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(7): 5 – 8.
- [7] Shen C, Pan Z, Cuiuri D, *et al.* Fabrication of Fe-FeAl functionally graded material using the wire-Arc additive manufacturing process[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2016, 47(1): 763 – 772.
- [8] Shen C, Pan Z, Ma Y, *et al.* Fabrication of iron-rich Fe-Al intermetallics using the wire-arc additive manufacturing process[J]. Additive Manufacturing, 2015, 7: 20 – 26.

第一作者简介:何杰,男,1993 年出生,硕士研究生。主要研究方向为电弧增材制造。Email: 13913035107@163.com
通信作者简介:冯曰海,男,副教授。Email: fyh@njjust.edu.cn