

某大型镁合金结构件复合修复技术的研究

郭振华 林翰 谢懿 李翔光

(贵州航天风华精密设备有限公司 贵州 贵阳 550000)

摘要: 文章针对大型镁合金结构件铸件缺陷率高,采用传统的单一缺陷修补技术合格率低现状,提出了一种新型的铸件复合修复技术,并且介绍该种修复技术在硬件配置、点状类铸造缺陷激光修复技术等方面的研究进展。

关键词: 镁合金结构件;单一;复合;激光修复

0 引言

随着航空航天技术的快速发展,镁合金因为其密度轻、比性能好、减震性能好等被广泛应用。镁合金结构件作为军用产品的重要受力结构件,提高铸件的一次合格率至关重要。目前,中小型镁合金铸件合格率为70%左右,大型镁合金构件铸件合格率为50%左右,大型结构复杂构件合格率甚至更低,而在报废铸件中,铸造缺陷占到90%左右,如果把缺陷用焊接技术加以修复,就可有效降低零部件的报废率。因此,有必要对镁合金铸件缺陷进行修复以提高铸件成品率,确保产品交付进度。武器装备零部件的修复再利用,具有重要的经济性与战略性。

目前,针对镁合金铸造缺陷的消除工艺有较多的方法,如焊接修复、表面涂覆修复、塑性变形修复、机械加工修复、粘结涂覆修复等。但由于工艺通用性限制以及修复质量限制,对于镁合金结构件而言,目前只有焊接修复具备适用性。

在焊接修复工艺中,目前以传统气焊和钨极氩弧焊为主,但是该类工艺修复合格率仅有50%上下,难以满足要求。而且,传统方法严重依赖人工经验,修复过程效率低、质量不稳定。而近年来研究较多的激光焊虽然精度高、对基体伤害小,但是其带来的应力变形问题仍然难以解决;较前沿的搅拌摩擦焊,由于焊接效率以及工艺通用性问题,应用领域仍然受限。

所以,发展高质量、高通用性的镁合金铸件缺陷修复技术,既要适用于不同类型缺陷的修补,同时还要保证修复后铸件性能和尺寸精度的要求,以及制备过程的效率,提升武器装备镁合金产品性能、可靠性和一致性,缩短产品研制周期,实现绿色制造,推动武器装备高质量发展,意义重大。

1 单一缺陷修补技术

钨极氩弧焊是镁合金最常用的焊接方法,具有价格低廉、易操作等优点,成熟应用于航空航天武器装备各类镁合金结构件的缺陷修复中,而采用钨极氩弧焊往往会使材料产生较大的热影响区和焊缝、合金元素的烧损,以及较高的残余应力和变形,使得焊接后镁合金存在接头力学性能低、热影响区晶粒粗大等缺点,远不能满足新一代高性能武器装备的应用要求。

激光焊作为一种先进的加工方法,具有焊接速度快、熔深大等优点,已经广泛应用于导弹武器装备的结构件研究中,但在焊接镁合金中,存在金属对激光束的反射,造成激光能量利用率低,激光与母材作用时间短,熔化金属凝固过快,导致熔池中气体不易逸出,形成气孔、热裂纹等缺陷,降低了接头的力学性能。此外,激光焊修复成本较高,设备投资昂贵,且镁合金导电率高,对激光的吸收率小,导致激光修复镁合金铸件优势不明显。

激光焊作为熔焊的一种,单纯用激光焊时,如果控制不好,易出现气孔、裂纹、夹杂、合金元素烧损等焊接缺陷。为克服上述问题,考虑开展固相搅拌摩擦焊方法来进行修补。

在国内外的研究中发现,采用搅拌摩擦焊焊接镁合金铸件可获得无缺陷、性能良好的修复区。搅拌摩擦焊焊接铸造镁合金可以解决熔焊焊接接头气孔多和组织粗大等问题,但对多种铸造镁合金的搅拌摩擦焊工艺还需要系统研究,扩大工艺参数窗口,目前搅拌摩擦焊只能进行结构简单的铸造镁合金焊接。针对某些复杂构件,如对曲线、曲面、变截面区域等尚无法焊接,并且在焊缝背面还需要加耐热垫板,使得搅拌摩擦焊的工艺适应性不强。

2 复合缺陷修补技术

目前,两种或多种焊接技术复合工艺已成为国内外

的研究热点。激光搅拌摩擦焊接的复合修复技术，兼具精度高、变形小等优点，已在欧美发达国家学术界研究报道中出现。但是，关于铸造镁合金激光-搅拌摩擦焊接修复技术的工程化应用却尚未出现，仍处于起步阶段。

2.1 搅拌摩擦焊焊接平台的搭建

为了满足镁合金铸造结构件缺陷修复的需要，对选择的设备厂家进行调研，选择的各个设备进行了自主集成，首先系统的主要设备有操作台（集成 PLC）、KUKA 机械手（7/8 轴集成了变位机）、IPG 激光器、水冷机、TIG 焊机。

其中，支持 Profibus 的设备有 PLC、KUKA 机械手、IPG 激光器和 TIG 焊机。系统使用 Profibus 总线将这 4 个设备连接起来，进行必要的通讯作业。同时，机械手的第 7 轴和第 8 轴分别控制着变位机的旋转轴和翻转轴，通过 Profibus 总线控制着 IPG 激光器和 TIG 焊接，是焊接系统的控制核心。整个镁合金结构件铸造缺陷激光焊接修复试验平台布局效果如图 1 所示。

该焊接修复试验平台由六轴机器人、焊接电源、D/L 型双轴变位机、6kW-IPG 激光器及其附件、稳压电源、水冷机构、用于集成的电源控制柜、焊接工装、氩气站及控制面板操作台组成。考虑到贵州多阴雨的天气特点，为防止空气中水分过高而影响镁合金铸造缺陷修复的焊接质量，特意设计建造了恒温恒湿房间。

2.2 搅拌摩擦焊均匀化试验平台的搭建

完成了自主开发的高端搅拌摩擦焊装备，具有铣削/钻孔/焊接/匙孔消除等核心技术的一体化集成设备，多项核心关键技术填补国内空白，可实现复杂结

构件及三维曲线焊缝的焊接，能满足镁/铝/铜等轻合金高质量、高效率的焊接需求，最大焊接产品能达到 19m×4m×2.8m×30mm（长×宽×高×厚）。特别是完成了三维并联回抽等关键技术的研发，并联主机头设计与并联回抽机构的控制系统技术为回抽式三维并联搅拌摩擦焊装备的核心技术，是实现三维复杂结构件焊接的关键。并联主机头是基于自由度分配方法与支链空间布局，设计成结构对称、受力性能良好的多自由度的高刚性、无间隙、高精度并联结构。并联回抽机构采用 PMAC 集成控制系统，为并联头虚拟了两个轴，来实现动平台在并联头内任意方向的偏角动作。

2.3 点状类铸造缺陷激光修复研究

首先针对镁合金结构件铸件缺陷特点，开展了平板点状类铸造缺陷的激光修复研究，在平板上打一些类似于铸造缺陷的点状小孔，图 2（a）所示为打磨后的镁合金试板，图 2（b）所示为镁合金试板上打的小孔。

首先对镁合金试板进行打磨抛光，打磨掉表面的氧化膜，再用酒精清洗干净。然后利用小钻子打一排小孔，开展激光修复工艺试验。

图 3（a）所示为试板装夹图，图 3（b）所示为试板激光焊接修复工艺试验，焊接工艺参数见表。

由表可知，对应图 3（b）中的 1~4 道焊缝，1# 焊缝表面较为平滑，2# 焊缝除表面稍微有点较深的凹陷之外，焊缝表面也较为平滑，3# 焊缝表面凹凸不平，成型较差，4# 焊缝熔宽明显变宽，表面凹坑较多，成型不美观。由 1# 和 2# 比较可知，在焊接速度一定的情况下，随着激光功率的提高，焊缝熔宽和熔深都增加，但熔深

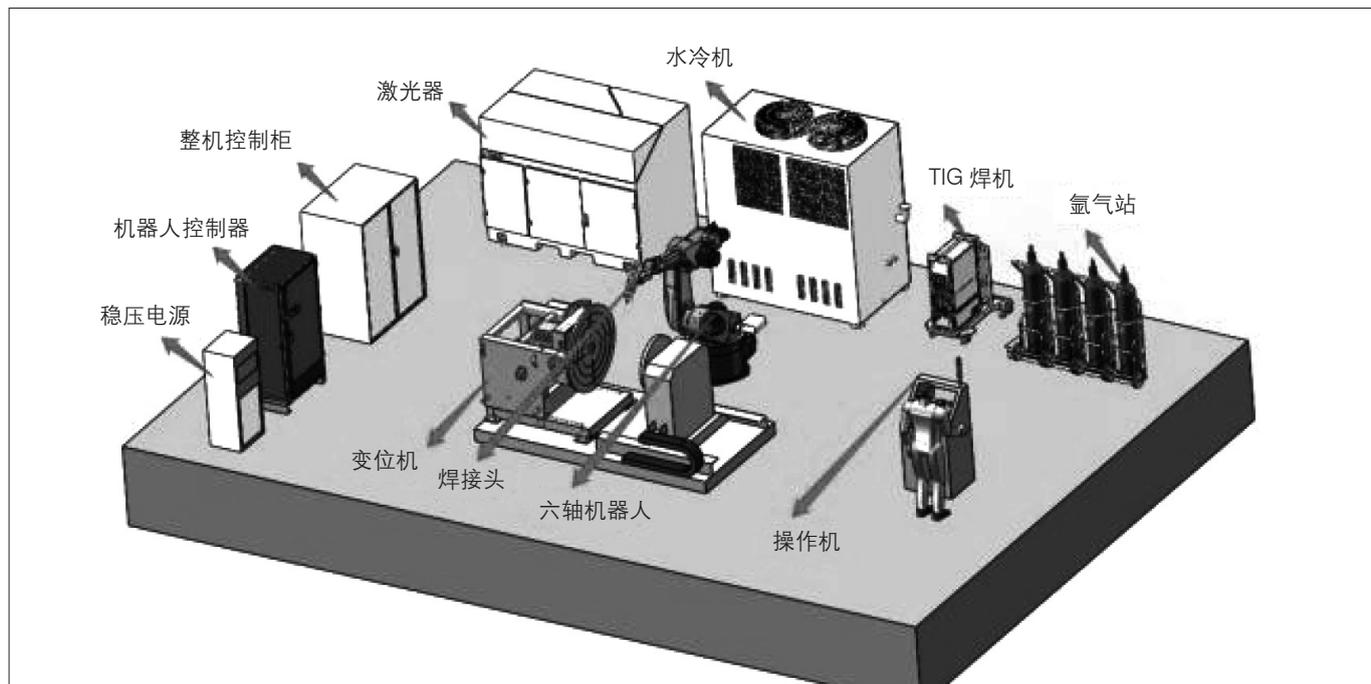


图 1 激光焊接修复平台布局示意图

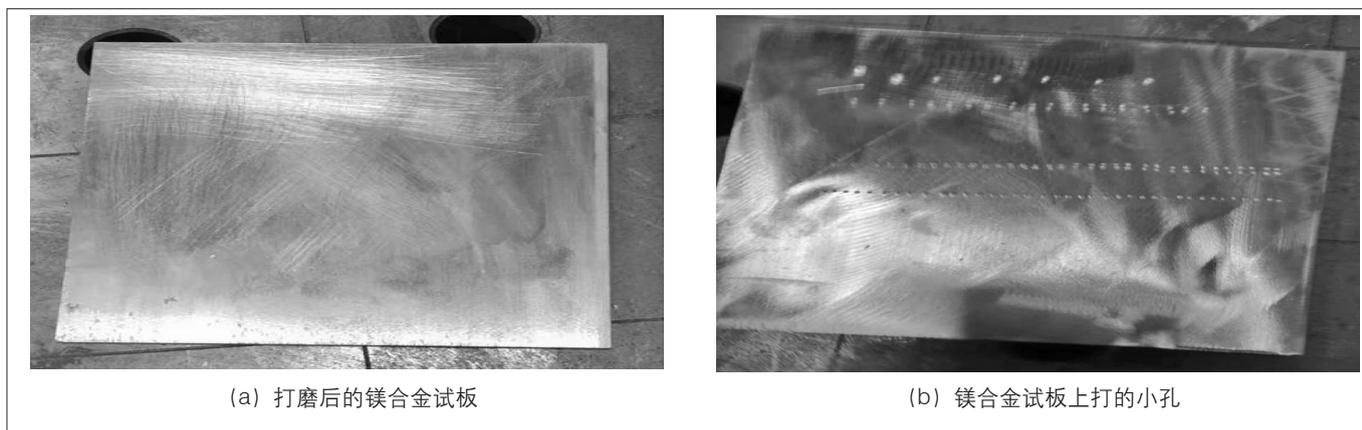


图2 镁合金试板

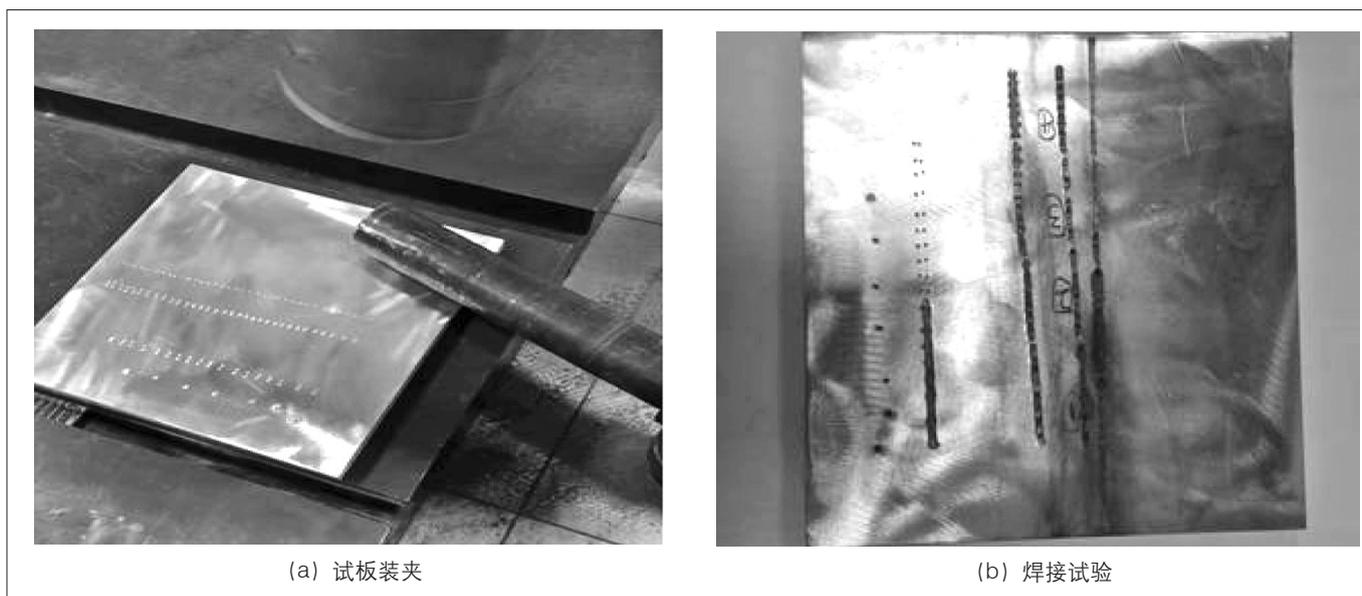


图3 试板装夹及焊接试验

表 焊接试验工艺参数

序号	工艺参数				
	激光功率 / W	焊接速度 / (m/min)	离焦量 / mm	保护气流量 / (L/min)	激光偏转角度 / (°)
1#	1000	1.6	+11	19	10
2#	1200	1.6	+11	19	10
3#	1200	1.8	+11	19	10
4#	1500	2.0	+11	19	10

增加比较明显,故2#焊缝熔深较大;由2#和3#焊缝可知,在激光功率一定的情况下,随着焊接速度的增大,熔宽和熔深变窄,焊缝成型不美观,熔宽呈现出宽窄不一致、焊缝深度深浅不一致的现象。由4#与1#、2#、3#焊缝比较可知,4#焊缝的熔深和熔宽都明显变大,成型也变差。故1#焊缝的参数比较合理,下面利用1#焊缝的参数进行试件长焊缝的焊接试验(图4)。

由图4可知,两条焊缝的表面成型较好,上面稍微有点凹坑,是由于所打的小孔稍大,下一步可打一些较小的孔,以便与实际的镁合金结构件点状铸造缺陷相对



图4 焊接试验

应,对于大一点的小孔采取激光填丝焊进行修复。总之,对镁合金结构件铸造缺陷的点状缺陷取得了初步的成果,摸索出了合适的激光焊接工艺参数。

2.4 镁合金试件初步的搅拌摩擦焊试验

对4mm厚的镁合金试件进行了初步的搅拌摩擦焊工艺试验,为后期开展的镁合金结构件修复区域搅拌摩擦焊均匀化处理奠定基础。

由图5可知,对镁合金试件初步开展的搅拌摩擦焊工艺试验,焊缝成型良好,证实了采用搅拌摩擦焊可以完全达到修复区域均匀化处理的要求。利用自制的不带

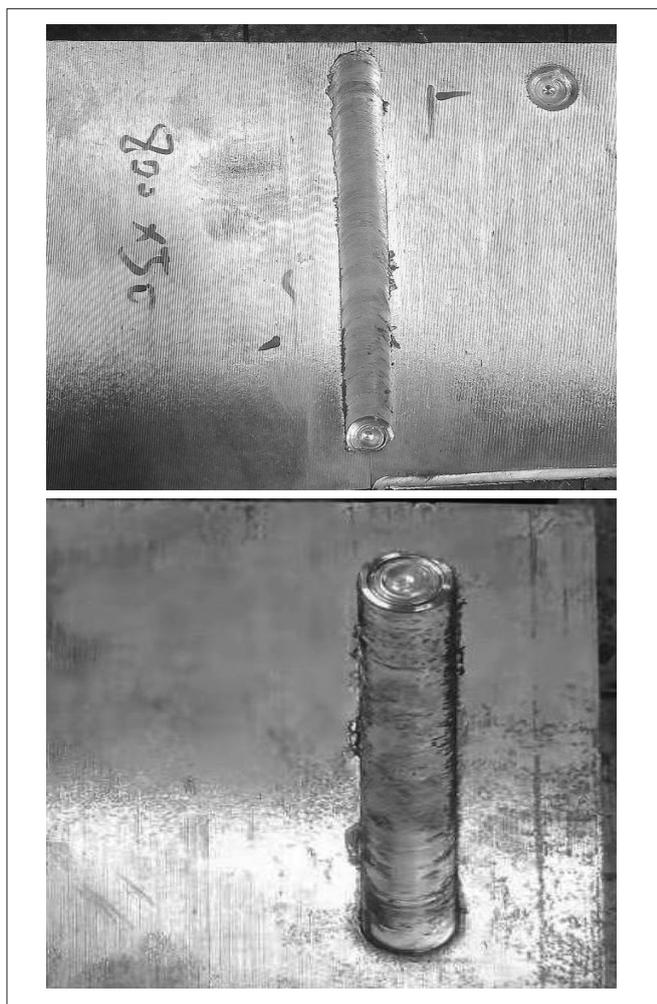


图5 镁合金试件的搅拌摩擦焊试验焊缝效果图

搅拌针的搅拌头可以完成镁合金结构件修复区域的均匀化处理，达到减小应力或使应力均匀化的目的。

2.5 复合修复技术在镁合金铸件上应用

某大型镁合金铸件在其蒙皮某部位易产生局部性铸造缺陷，现采用1#激光焊接参数以及自制的不带搅拌针的搅拌头对缺陷部位进行搅拌摩擦焊修复，表面缺陷区

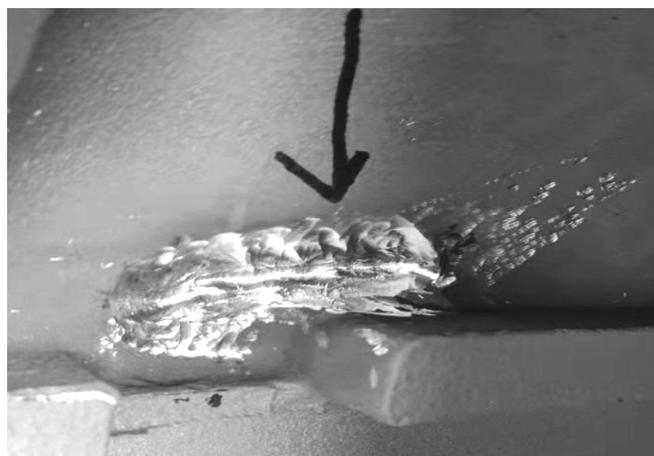


图6 某镁合金铸件的缺陷修补效果图

域处成型良好，修复后对该部位进行打磨修整，复拍X光，检测该修复区域符合铸件相关要求。修复后的情况见图6。

3 结语

通过开展一种新型的复合镁合金修复技术的研究得出以下结论：

- (1) 初步完成了该新型修复技术硬件的相关配置；
- (2) 初步得出了点状类铸造缺陷激光修复的相关技术参数；
- (3) 初步探索了搅拌摩擦焊对镁合金的均匀化修复；
- (4) 初步实现了该复合修复技术在镁合金铸造缺陷修复中的应用。

参考文献：

- [1] 王目孔，孙建新，刘新超. 铸造镁合金研究与应用进展[J]. 有色金属工程, 2012, 2(02): 56-59.
- [2] 陈怡，邹文兵，郭龙涛，等. 铸造镁合金的焊接修复技术研究现状及发展方向[J]. 材料导报, 2020, 34(15): 15126-15131.