

镁合金磁控 TIG 焊工艺参数的优化设计

苏允海, 蒋焕文, 吴德广, 刘政军

(沈阳工业大学 材料科学与工程学院, 沈阳 110870)

摘 要: 在 AZ31 镁合金的 TIG 焊过程中施加交流纵向磁场, 通过调节磁场参数和焊接参数进行施焊. 为了研究磁场参数与焊接工艺参数联合作用下镁合金焊接接头组织性能的变化规律, 简化试验步骤, 采用正交试验对磁场参数和焊接工艺参数进行设计, 并对不同参数下焊接接头的显微组织、硬度和拉伸性能进行分析, 确定最佳参数匹配. 结果表明, 当焊接电流为 80 A, 磁场电流为 2 A, 磁场频率为 20 Hz 时, 镁合金焊接接头的力学性能达到最佳值.

关键词: 镁合金; 磁控焊接; 参数优化设计

中图分类号: TG457.19 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2012)12-0085-04



苏允海

0 序 言

镁合金作为一种具有轻质、比强度大、减震性优良、可回收等特点的工程结构材料倍受关注, 被称为“21 世纪绿色材料”. 随着科技的发展, 镁合金的应用范围也日益扩大, 已包括 3C 产品、自行车、汽车、航空航天等行业. 随着镁合金研究和应用的深入, 大量产品结构复杂性的提高, 镁合金焊接技术的重要意义将日益凸显^[1].

磁控焊接是近几年新兴的焊接技术, 由于焊接过程中施加磁场产生的电磁搅拌作用改变电弧的传质、传热过程, 进而控制晶粒的生长^[2], 达到提高焊接接头综合性能的目的, 在低碳钢和铝合金焊接中应用较多, 但将其引入镁合金的焊接过程中, 在国内外还处于研究阶段. 通过前期的工作可以发现, 外加磁场对镁合金焊接过程中常出现的焊接性问题有很好的改善作用, 并可改变焊接接头力学性能^[3-5]. 但并非施加磁场就可以得到良好的接头性能, 磁场参数和焊接工艺参数如果不匹配, 磁场的作用效果反而会降低焊接接头的质量. 因此磁场参数和焊接工艺参数的选择具有重要的意义. 但是磁控焊接过程中焊接参数和磁场参数较多, 而且它们之间在焊接过程也会相互干涉, 因此采用传统的循环试验无法全面准确地反映各参数对焊接过程及接头性能的影响规律. 正交试验是在统计学的基础上创立的先

进试验方法, 可以大大简化试验次数, 提高效率, 降低试验成本. 为此将正交试验引入到磁控镁合金的 TIG 焊过程中, 通过对施焊参数的正交试验, 确定最佳参数匹配, 达到工艺优化、提高焊接接头综合性能的目的.

1 试验方法

试验选用母材为轧制态 AZ31 镁合金, 试件的规格为 5 mm × 100 mm × 200 mm, 其化学成分为 2.72% Al, 0.79% Zn, 0.25% Mn, 0.018% Si, 0.003% Fe, 其余为 Mg. 焊丝与母材具有相同的化学成分, 规格为 2 mm × 2 mm × 600 mm.

试验所用的外加磁场是一种以一定频率间歇交变的纵向磁场. 该磁场由放置在工件下面的激磁线圈产生. 磁场占空比、频率及电流大小均可以调节, 产生与电弧轴线平行的纵向同轴磁场. 试验过程中占空比固定为 50%, 磁场电流及频率根据实际情况进行调节. 焊接时采用交流脉冲钨极氩弧焊机手动焊接试板, 并制备成相应的试验试样, 焊接工艺参数如表 1 所示. 焊后主要对试样进行拉伸、硬度力学性能检测, 并采用金相显微镜对焊缝金属的微观组

表 1 焊接工艺参数

Table 1 Welding parameters

焊接电流	气体流量	喷嘴直径	钨极直径	钨极伸出长度
I/A	Q/(L·min ⁻¹)	D ₁ /mm	D ₂ /mm	L/mm
60	7~9	10	2	1.5~3

收稿日期: 2011-10-17

基金项目: 辽宁省教育厅资助项目(201124125); 辽宁省自然科学基金资助项目(20072041)

织进行分析,进而确定最佳工艺参数匹配。

2 试验结果及分析

2.1 正交试验模型的确立

磁场参数中主要调节磁场电流和磁场频率。在 TIG 焊施焊过程中采用手动送丝,其焊接速度并非定值,大约 70 mm/min 左右,而由于 TIG 焊的负载特性曲线斜率较小,使得电源随电流的变化较小,焊接过程中的热输入主要取决于焊接电流,所以在焊接工艺参数中焊接电流最为重要。试验选取磁场电流、磁场频率和焊接电流三个参数作为因素进行试

验,每个因素取 5 个变量,即有 5 个水平。参照正交试验中的正交表,水平必须选全、因素可以缺席的原则,选择 $L_{25}(5^6)$,即试验总数为 25,试验中包括 6 个因素,5 个水平。试验中 3 个因素分别为焊接电流、磁场电流、磁场频率。其中焊接电流的变化范围为 60 ~ 100 A,变化幅度为 10 A,共 5 个水平;磁场电流的变化范围为 0.5 ~ 2.5 A,变化幅度为 0.5 A,共 5 个水平;磁场频率的变化范围为 5 ~ 25 Hz,变化幅度为 5 Hz,共 5 个水平。由于所选的正交表为 6 因素正交表,为了增加相应因素的数量,将焊接速度 70 mm/min,电弧电压 22 V 作为两补充因素添加到正交表内部,具体试验参数见表 2。

表 2 正交试验参数
Table 2 Orthogonal test parameters

编号	参数	编号	参数	编号	参数	编号	参数	编号	参数
1	60/0.5/5	6	70/0.5/20	11	80/0.5/10	16	90/0.5/25	21	100/0.5/15
2	60/1.0/10	7	70/1.0/25	12	80/1.0/15	17	90/1.0/5	22	100/1.0/20
3	60/1.5/15	8	70/1.5/5	13	80/1.5/20	18	90/1.5/10	23	100/1.5/25
4	60/2.0/20	9	70/2.0/10	14	80/2.0/25	19	90/2.0/15	24	100/2.0/5
5	60/2.5/25	10	70/2.5/15	15	80/2.5/5	20	90/2.5/20	25	100/2.5/10

2.2 拉伸性能的正交试验结果分析

按上述正交试验表中参数匹配进行施焊,并对焊接接头进行拉伸试验,将结果填入正交表中进行计算,其抗拉强度的因素指标如图 1 所示。从图 1 中可以看出,焊接接头的抗拉强度随焊接速度和电弧电压的增大变化较为平缓,而其它 3 条曲线变化较为剧烈,这说明焊接速度和电弧电压对焊接接头的抗拉强度作用效果不如其它参数,证实当初试验

因素的选择是合理的。抗拉强度随焊接电流、磁场电流、磁场频率的变化曲线均为极值曲线,并且它们的变化趋势也基本相同,都是随焊接电流、磁场电流及磁场频率的增大,抗拉强度先增大后减小,其中的最佳值分别出现在焊接电流 $I = 80$ A,磁场电流 $I_m = 2$ A,磁场频率 $f = 20$ Hz 处。至此可以推测当工艺参数为 $I = 80$ A, $I_m = 2$ A, $f = 20$ Hz 时,镁合金焊接接头的拉伸性能得到最佳值。

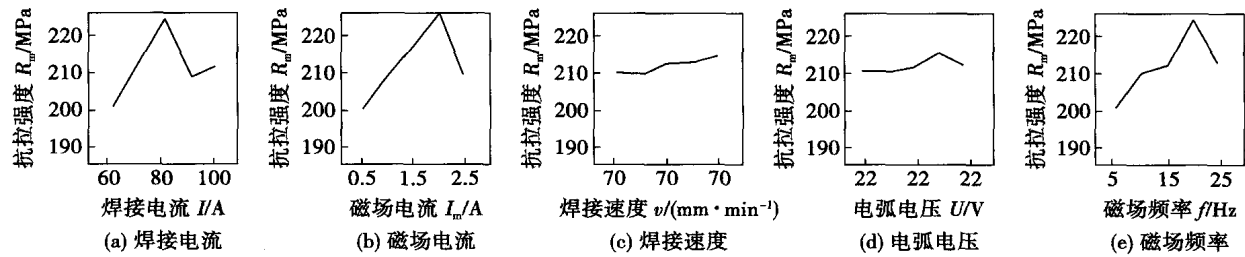


图 1 抗拉强度的正交因素指标图
Fig. 1 Orthogonal test coefficient factor of tensile strength

为了进一步验证试验模式及推理的准确性,对其进行方差分析,结果见表 3。从表 3 可以看出,经过偏差平方和计算,焊接电流、磁场电流、磁场频率的 F 比(因素水平变化引起的平均偏差平方和与误差平均偏差平方和的比值)都要大于 F 临界值

3.84,而焊接速度和电弧电压的 F 比均小于 F 临界值。这表明焊接接头的拉伸性能对焊接电流、磁场电流、磁场频率的变化表现出较高的敏感性,而对焊接速度、电弧电压的敏感性则较小,说明试验过程中确定焊接电流、磁场电流、磁场频率为 3 个主要因

表 3 各因素的方差分析
Table 3 Variance analysis of tensile strength

因数	焊接电流 I/A	磁场电流 I_m/A	焊接速度 $v/(mm \cdot min^{-1})$	电弧电压 U/V	磁场频率 f/Hz	误差
偏差平方和	1 459.662	1 990.294	83.042	77.438	1 482.706	160.48
自由度	4	4	4	4	4	8
F 比	18.191	24.804	1.035	0.965	18.478	—
F 临界值	3.84	3.84	3.84	3.84	3.84	3.84
显著性	显著	显著	—	—	显著	—

是正确的,也说明试验模式及试验参数的选择是合适的.

2.3 硬度的正交试验结果分析

图 2 是正交试验中硬度随工艺参数变化的因数指标效果曲线. 从图 2 中可以发现,随着焊接电流的增大,焊接接头的硬度先增大,并在焊接电流为 80 A 处取得最大值,之后随着焊接电流的进一步增

大,硬度反而变小. 同样的变化规律在磁场电流、磁场频率中也出现了,焊接接头的硬度都是随着磁场电流、磁场频率先增大后减小,它们的最大值分别出现在磁场电流 2 A,磁场频率 20 Hz. 而随焊接速度和电弧电压的增大基本不变. 因此对于硬度而言,最佳参数匹配为焊接电流 80 A,磁场电流 2 A,磁场频率 20 Hz.

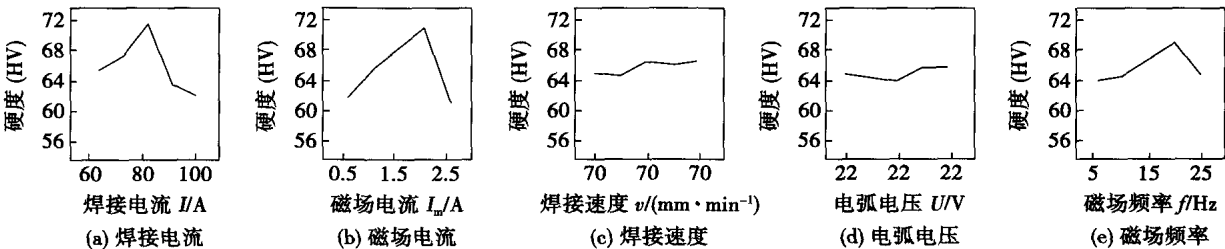


图 2 硬度的正交因数指标效果曲线图
Fig. 2 Orthogonal test coefficient factor of hardness

表 4 是硬度随工艺参数变化正交试验的方差分析结果. 从表 4 中的数据及其计算结果可以发现,焊接电流、磁场电流、磁场频率 3 个参数对硬度的影

响比较大,其中 F 比明显高于 F 临界值,这说明这 3 个参数对硬度的影响明显,这一点从图 2 曲线的走势也可以发现.

表 4 硬度的方差分析
Table 4 Variance analysis of hardness

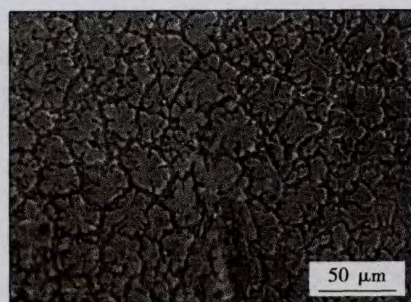
因数	焊接电流 I/A	磁场电流 I_m/A	焊接速度 $v/(mm \cdot min)^{-1}$	焊接电压 U/V	磁场频率 f/Hz	误差
偏差平方和	259.27	324.918	14.338	10.838	82.518	25.18
自由度	4	4	4	4	4	4
F 比	20.597	25.812	1.139	0.861	6.555	—
F 临界值	2.81	2.81	2.81	2.81	2.81	—
显著性	显著	显著	—	—	显著	—

综合上述正交试验可以发现,焊接电流、磁场电流、磁场频率对于镁合金焊接接头的拉伸性能和硬度的影响规律基本相同,而且在拉伸性能和硬度取得最佳值时的 3 个参数也相互重合,均为焊接电流 80 A,磁场电流 2 A,磁场频率 20 Hz. 但是对比正交试验表格可以发现此点并不在 25 个正交试验之中,此点只是理论计算最佳点,为了进一步验证正交试验推理正确性,对焊接电流 80 A,磁场电流 2 A,磁

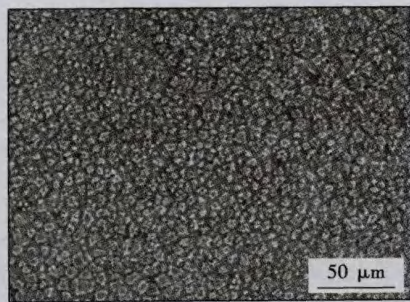
场频率 20 Hz 的最佳配比值进行相应的补充试验,即在此参数下焊接镁合金板材,并对焊接接头的抗拉强度和硬度进行测定,结果为抗拉强度 254 MPa,断后伸长率 14.5%,断面收缩率 17.5%,硬度为 82 HV. 对比上述图表中的相关数据可以发现,当焊接电流 80 A,磁场电流 2 A,磁场频率 20 Hz 时,镁合金焊接接头的静力学性能明显得到改善,这就说明此参数确为最佳参数配比.

2.4 显微组织分析

显微组织分析是材料研究领域中最为常用的检测分析方法,通过对材料的显微组织分析可以了解材料力学性能发生变化的原因^[6]。由于采用正交试验,每次试验的参数均不同,这使得显微组织对比分析过程中无法找出参数的共同点,但是根据上述力学性能试验,可以发现在不同参数下焊接接头的力学性能变化较为明显,因此将力学性能最佳点的显微组织和非最佳任意一点的显微组织进行对比,以此研究不同参数下焊接接头组织的变化规律,探究磁场和工艺参数对焊接接头的影响规律及作用机理,结果如图3所示。从图3可以看出,不同参数下焊缝的物相组成基本相同,都是由基体 α -Mg和第二相 β -Al₁₂Mg₁₇组成的^[7],但是组织形态变化非常明显。在最佳参数下,镁合金焊缝区域的基体 α -Mg相明显细化,晶粒度大幅提高,使得焊缝的细晶强化效果显著增强,这是镁合金焊接接头力学性能提高的主要原因;此外在合适的参数下,焊缝区域中第二相 β -Al₁₂Mg₁₇的分布形态也有一定的变化,由于基体晶粒的细化,使得在其周围析出第二相 β -Al₁₂Mg₁₇呈弥散分布,而且由于初生 α -Mg数量增多,晶界表面积增大,而 β -Al₁₂Mg₁₇相的总数量基本不变(镁合金中铝的含量一定,可供形成 β -Al₁₂Mg₁₇的铝被限制),这使得 β -Al₁₂Mg₁₇的分布更加弥散,由原先的



(a) $I=80\text{ A}$, $I_m=0.5\text{ A}$, $f=5\text{ Hz}$



(b) $I=80\text{ A}$, $I_m=2\text{ A}$, $f=20\text{ Hz}$

图3 不同参数下焊接接头的显微组织

Fig. 3 Microstructure of welded joint under different parameters

网状分布变为点状分布,减小了对基体的割裂作用(β -Al₁₂Mg₁₇相为电子化合物具有较高的硬度和脆性),增强了第二相强化作用,并进一步提高了焊接接头的综合力学性能。

3 结 论

(1) 在镁合金磁控 TIG 焊过程中采用正交试验对工艺进行优化,选取焊接电流、磁场电流和磁场频率为主要因素,经过正交试验计算出合适试验参数。

(2) 当焊接电流为 80 A,磁场电流为 2 A,磁场频率为 20 Hz 时,镁合金焊接接头力学性能达到最佳值,此时抗拉强度 254 MPa,断后伸长率 14.5%,断面收缩率 17.5%,硬度为 82 HV。

(3) 在合适的参数匹配下,焊接接头的显微组织得到细化,第二相弥散分布,使得细晶强化和第二相强化效果明显,提高焊接接头的综合力学性能。

参考文献:

- [1] 刘政军,苏允海,刘 铎,等. 镁合金及其成型技术综述[J]. 沈阳工业大学学报, 2006, 28(1): 14-20.
Liu Zhengjun, Su Yunhai, Liu Duo, et al. Review of magnesium alloys and their forming technologies[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2006, 28(1): 14-20.
- [2] 罗 键. 外加纵向磁场 GTAW 焊接熔池流体流动与传热行为的研究[D]. 西安: 西安交通大学博士论文, 1999.
- [3] 苏允海,刘政军,王 玉,等. 磁场参数对 AZ31 焊接接头组织和性能的影响[J]. 焊接学报, 2007, 28(5): 45-49.
Su Yunhai, Liu Zhengjun, Wang Yu, et al. Effect of magnetic field parameters on microstructure and properties of welded joint of AZ31 magnesium alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(5): 45-49.
- [4] Su Yunhai, Liu Zhengjun, Liu Duo. Effect of magnetic field on microstructure and properties of magnesium alloy welded joint with GTAW[J]. Manufacturing Process Technology, 2011(189/193): 3507-3511.
- [5] 苏允海,温小波,刘 铎,等. 磁场电流对镁合金焊接接头疲劳性能的影响[J]. 焊接学报, 2011, 32(4): 79-82.
Su Yunhai, Wen Xiaobo, Liu Duo, et al. Effect of magnetic field current on fatigue properties of magnesium alloy welded joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(4): 79-82.
- [6] 冯 端. 金属物理学[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [7] 王 鹏,宋 刚,刘黎明. 镁合金 MIG 焊接工艺及焊接接头组织性能分析[J]. 焊接学报, 2009, 30(12): 50-54.
Wang Peng, Song Gang, Liu Liming. Welding technology and microstructure of MIG welded magnesium alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(12): 50-54.

作者简介: 苏允海,男,1980 年出生,博士,讲师。主要从事材料焊接性及表面强化方面研究。发表论文 20 余篇。Email: su_yunhai@yahoo.com.cn