

电子束焊接 5A06 铝合金接头 Mg 元素 蒸发烧损行为分析

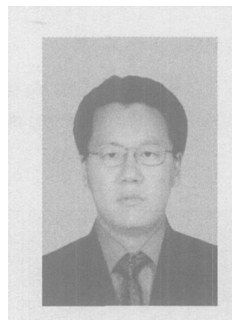
汪兴均, 黄文荣, 魏齐龙, 沈显峰

(中国工程物理研究院 机械制造工艺研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 研究了 5A06 铝合金电子束焊接后熔池内 Mg 元素的分布及其对焊缝硬度的影响, 并分析了焊接工艺参数对 Mg 元素烧损行为的影响。结果表明, 在接头区域随着熔深的增加, Mg 元素含量增加, 即烧损程度减小, 同时显微硬度增大; 随着加速电压和束流的增加, 熔深增加, Mg 元素烧损率降低; 随着焊接速度增加, Mg 元素烧损率降低, 熔深却减小。为减小 Mg 元素烧损, 在电子束焊时可适当增加焊接的加速电压与束流, 加快焊接速度。

关键词: 5A06 铝合金; 电子束焊; Mg 元素蒸发烧损

中图分类号: TG456.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2006)11-061-04



汪兴均

0 序 言

5A06 防锈铝合金属于 Al-Mg 系合金, 退火后焊接性、抗蚀性良好, 冷变形后可提高强度, 而且 5A06 铝合金具有低密度、是电与热的良导体、非磁性、反射性、阳极氧化性等综合性能。因此, 在中载构件、液体容器、管道等零件中已被广泛采用, 而且 5A06 铝合金薄壁件在某些压力容器研制中的应用也十分广泛。

与钨极氩弧焊相比, 采用真空电子束焊接铝合金, 不但焊件的熔深大, 热影响区小, 焊缝纯度高, 而且变形量也小, 接头力学性能好。

电子束焊接时高速电子流轰击工件表面时被轰击的金属表层瞬间可达到极高的温度(10^4 °C 以上), 5A06 铝合金焊接熔化过程中, 由于 Mg 的沸点(1 380 K)低于铝的沸点(2 723 K), 且 Mg 的沸点与 Al 的熔点(933 K)仅差 447 K, 所以在高温熔池中, Mg 元素将有一部分成为金属蒸气并逸出熔池。而在 5A06 铝合金中 Mg 是主要强化元素, Mg 含量的变化将影响合金的多方面性能^[1]。

作者结合某压力容器的生产, 研究了 5A06 铝合金电子束焊接时焊缝中 Mg 元素含量的变化规律及对材料硬度的影响, 以及焊接工艺参数对 Mg 元素烧损的影响规律; 并结合电子束焊物理过程形成原理, 分析了焊接参数对 Mg 元素烧损的影响机理。

1 试验材料与方法

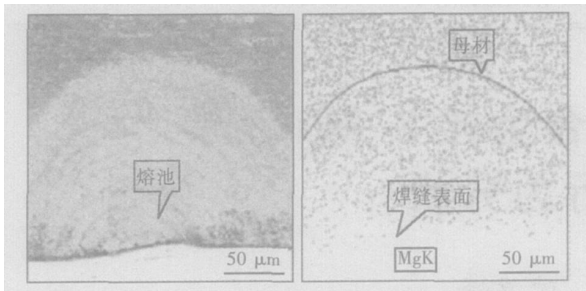
试验使用的 5A06 铝合金化学成分(质量分数, %)为: Si 0.40, Cu 0.10, Mn 0.5~0.8, Mg 5.8~6.8, Zn 0.20, Be 0.001~0.005, Ti 0.02~0.10, Fe 0.40, 余量为 Al。试样为环状($\phi 50$ mm \times 30 mm), 厚度为 1.2 mm。

试验采用德国 LEYBOLD-HERAEUS 公司生产的 ESW1002/7.5-150 型高压高真空电子束焊机进行焊接。采用 NORAN System Six X 射线能谱仪分析焊缝熔池不同深度位置的 Mg 元素含量及分布。用 MHV2000 数显显微硬度计测试焊缝显微硬度, 载荷 100 g, 加载时间 15 s。讨论不同试样烧损情况对硬度的影响时, 各试样显微硬度测试位置居焊缝轴线附近, 距焊缝表面 0.1 mm。

2 Mg 元素烧损分布及对焊缝硬度的影响

2.1 Mg 元素在熔池内的分布

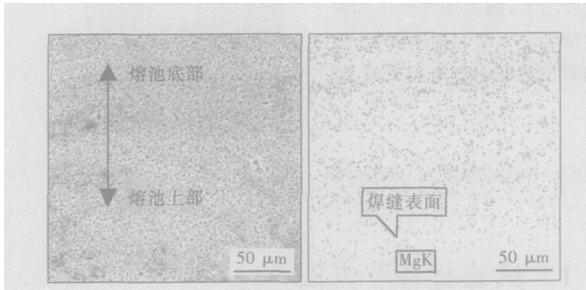
图 1 为用 X 射线能谱分析仪得到的整个熔池 Mg 含量的面扫描分布图, 由图可知, 熔池中焊缝表面 Mg 含量相比较于母材有明显降低, 焊缝底部 Mg 含量与母材很接近。结合图 2 可知, 随着熔深的增加, Mg 含量也增加, 即在焊缝表面的元素烧损比内部更大。



(a) 熔池被扫描区域形貌 (b) 被扫描区域 Mg 含量分布

图 1 整体熔池 Mg 含量面扫描分布图

Fig. 1 Surface scanning distribution of Mg content in molten pool



(a) 熔池被扫描区域形貌 (b) 被扫描区域 Mg 含量分布

图 2 局部熔池 Mg 含量分布图

Fig. 2 Surface scanning distribution of Mg containment in local molten pool

2 2 Mg 元素烧损对焊缝硬度的影响

为了考核 5A06 铝合金焊缝的力学性能, 用焊缝的硬度来间接的反映, 通常情况下, 材料硬度越高, 其强度越大。图 3 为硬度分布试样焊缝横截面显微硬度测试各点的压痕图, 结合图 4, 5 可知: 焊缝熔化区硬度明显低于母材, 且在焊缝内部随着焊缝深度的增加显微硬度增加。由于 Mg 元素在合金中主要起强化作用, 结合前面所述 Mg 元素在焊缝中的分布规律可知造成这种现象的原因是: 熔化区内 Mg 元素存在一定程度的烧损导致了显微硬度的下降, Mg 元素烧损程度越高, 硬度降低越明显。

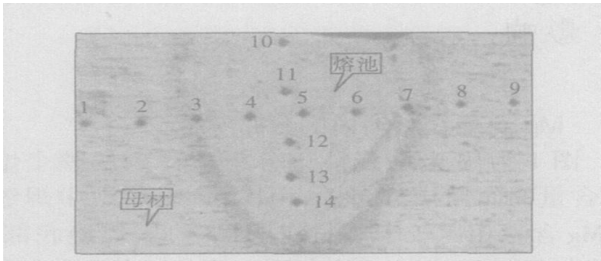


图 3 显微硬度测试各点压痕图

Fig. 3 Dents of microhardness test

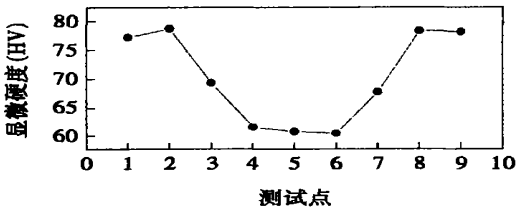


图 4 焊缝横向显微硬度分布

Fig. 4 Microhardness distribution along horizontal direction of weld

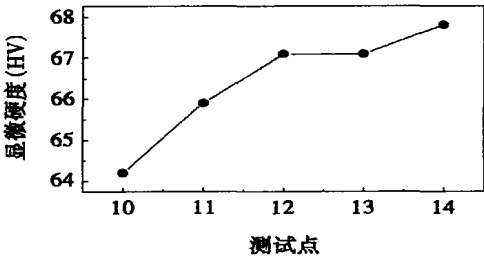


图 5 焊缝纵向显微硬度分布

Fig. 5 Microhardness distribution along longitudinal direction of weld

为了减小不同试样母材 Mg 含量的差异对试验结果的影响, 采用烧损率来表征不同试样 Mg 的烧损情况, 计算公式为

烧损率 =
$$\frac{\text{母材镁的质量分数} - \text{焊缝镁的质量分数}}{\text{母材镁的质量分数}} \times 100\%.$$

在比较不同试样烧损情况时均以烧损最严重区域的烧损率平均值作比较。

由表 1 可知, 随着焊缝 Mg 元素烧损率的增加, 焊缝的硬度降低, 其原因也是 Mg 元素烧损程度差异造成的。

表 1 不同试样烧损率与显微硬度对比

Table 1 Comparison of evaporation loss percent and microhardness between different samples

试样号	I	II	III
烧损率(%)	50.2	63.9	88.3
显微硬度平均值(HV)	63.37	60.77	49.83

3 焊接参数对 Mg 元素烧损的影响规律与机理分析

3. 1 焊接参数对 Mg 元素烧损的影响规律及应用
研究 Mg 元素烧损现象的目的是为了得到在确

保焊接深度的条件下使 Mg 元素烧损率更低的焊接工艺方案。使用 3 因素 3 水平的正交试验考察电子束焊接时加速电压、束流、焊接速度对 Mg 元素烧损的影响。试验选用正交表 $L_9(3^4)$ 安排试验, 试验因子水平表见表 2, 水平 1, 2, 3 的值按 10% 递增。

表 2 正交试验因子水平表
Table 2 Orthogonal design factor level

因子	加速电压 U/kV	束流 I/mA	焊接速度 $v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$
水平 1	81	1.59	13.33
水平 2	90	1.77	14.6
水平 3	100	1.96	16.5

正交试验因子计划表及结果见表 3。由表 3 可得焊接参数对烧损率与熔深的影响趋势级差分析图(图 6)。由图 6 可知, 加速电压、束流、焊接速度对熔深影响显著。随着加速电压和束流的增大, 熔深增大, 而随着焊接速度增大, 熔深减小。同时, 加速电压、束流、焊接速度对烧损率的影响也很显著, 尤其是加速电压与束流。随着加速电压、束流、焊接速度的增加烧损率降低。

在生产中, 可以根据对熔深和力学性能的的具体要求, 合理安排加速电压、束流和焊接速度等主要焊接参数。可以适当增加加速电压和束流, 同时增加焊接速度, 在确保熔深的前提下, 将烧损率控制在一个合理的范围内。

表 3 正交试验实施计划及结果
Table 3 Orthogonal experiment scheme and experimental data

试验号	正交试验因子			试验结果	
	加速电压	束流	焊接速度	熔深 h/mm	烧损率 (%)
1	1	1	3	0.20	77.9
2	2	1	1	0.35	88.3
3	3	1	2	0.39	71.7
4	1	2	2	0.26	71.5
5	2	2	3	0.32	63.9
6	3	2	1	0.80	50.2
7	1	3	1	0.51	73.4
8	2	3	2	0.50	58.4
9	3	3	3	0.53	34.8

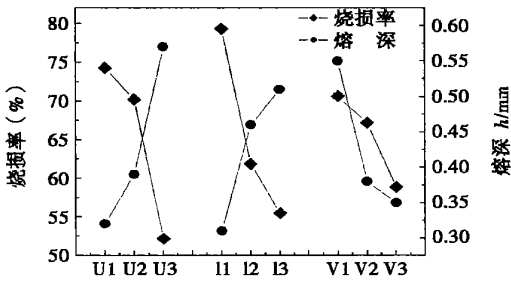


图 6 焊接参数对熔深及烧损率影响趋势级差分析
Fig. 6 Trend grading analysis influence of welding parameters on fusion penetration and evaporation loss

3. 2 焊接参数对 Mg 元素烧损的影响机理分析

当电子束焦点的功率密度达到 $10^5 \text{ W}/\text{cm}^2$ 以上时, 材料在电子束集中冲击下将发生熔化和汽化形成深熔焊。电子束集中冲击材料表面时, 在极短的行程内将其动能快速转换为热能, 工件受冲击部位被瞬时熔化, 而毗邻区域只有很少的热传导, 此后熔化材料进一步升温 and 汽化, 形成强烈的蒸气流, 蒸气流的反冲作用将液态金属排向四周, 压迫熔池下凹形成一个被薄层液体包围的蒸气充满式小孔, 束流穿过小孔通道对熔池底部进行连续的冲击, 在熔化与汽化挖掘作用下形成一个细长的薄层空腔, 即“匙孔”。由于在小孔底部附近有较高的温度梯度, 根据“Marangoni”效应, 不均匀表面温度将引起表面张力的变化从而驱动熔化金属流向熔池尾部^[3]。“匙孔”是蒸气压和表面张力梯度引起的向上和向外的熔体流动的共同结果^[3]。这种向上和向外的熔体流动就产生了对熔池的搅拌作用, 这种搅拌作用能将熔池底部的物质更多的带到熔池上部, 弥补上部由于烧损而含量减少的合金元素, 从而使 Mg 元素的烧损率降低^[4]。由于熔池搅拌作用的大小与蒸气压力大小成正比, 蒸气压力越大, 熔池搅拌作用越明显, 蒸气压力的大小与电子束的功率密度直接相关^[5]。因此加速电压、束流越大时, 电子束功率越高, 功率密度也越大, 电子束对熔池的搅拌作用增强, 此时, 熔深增加, Mg 元素的烧损率降低。

焊接速度降低时, 作用在工件上的热输入增加, 熔池温度升高, 熔深增加; 此时, 熔池熔化前沿与匙孔壁间的液体金属增多, 此区域液体金属直接处于电子束的下方, 在电子束的直接作用下, 金属温度高, 蒸发快。焊接速度降低时, 由于熔池熔化前沿与匙孔壁间的液体金属增加从而使 Mg 元素烧损随之增加。尽管此时熔池前、后熔化边缘的蒸气压强差

和蒸气反作用压强差增加, 导致前熔化边缘附近的金属熔体向后熔化边缘附近流动, 客观上起到了对熔池的搅拌作用^[9]。由于这种熔池前后流动的传质过程对整个熔池元素的平衡作用有限, 因此此时熔池烧损程度表现为增加。

4 结 论

- (1) 同一试样焊缝熔池内, 随着熔深的增加 Mg 元素烧损降低, 显微硬度增加, 在离表面同一深度上, 熔池中心轴线上显微硬度最低, 愈靠近两边热影响区, 显微硬度越高。
- (2) Mg 元素烧损对熔池内部显微硬度有较大影响, 烧损率越低的试样焊缝显微硬度越高。
- (3) 加速电压、束流、焊接速度对 Mg 元素烧损影响显著, 三个参数的增加均会使 Mg 元素的烧损率降低。因此在生产中要得到某一熔深的焊缝可以增加焊接功率提高焊接速度保证其熔深并减少 Mg 元素的烧损, 以使焊缝的力学性能更优。

参考文献:

[1] 刘静安, 谢水生. 铝合金材料的应用与技术开发[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004

[2] Debroy T, David S A. Physical processes in fusion welding[J]. Reviews of Modern Physics, 1995, 67(1): 85—112

[3] Basalaeva M A, Bashenko Y V. The movement of metal in the weld pool in electron beam welding[J]. Welding Research Abroad, 1979, 25(3): 40—42

[4] 周 琦, 刘方军. 电子束深熔焊熔质密度分布与熔池流动行为[J]. 焊接学报, 2001, 22(5): 17—20

[5] Schauer D A. Thermal and dynamic effects in electron beam welding cavities[D]. Ph. D. Thesis. Lawrence Livermore Lab., University of California, 1977

[6] Stefanov B, Petrov P, Pirgov P. Electron beam evaporation and welding: plasma formation and liquid pool in stabilities[J]. Vacuum, 1988, 38 (11): 1029—1033.

作者简介: 汪兴均, 男, 1977 年 12 月出生, 硕士研究生。研究方向为高能束焊接。

Email: wxj-my@163.com

[上接第 60 页]

参考文献:

[1] 唐建群, 巩建鸣, 张礼敬. 16MnR 钢液化石油气球罐失效分析[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2005 17(6): 432—434.

[2] 李祖貽. 湿硫化氢环境下在役压力容器的损伤与分析[J]. 压力容器, 2000, 17(3): 52—56

[3] Tang JianQun, Gong JianMing, Zhang XianChen, et al. Comparison on the cracking susceptibility of different low alloy steel weldments exposed to the environment containing wet H₂S[J]. Engineering Failure Analysis, 2006, 13(7): 1057—1064

[4] Th Boellinghaus. Finite element calculations of the pre and postheating procedure for sufficient hydrogen removal in butt joint[C]. Mathematical Modeling of Weld Phenomen 3 the Institute of Materials, 1997

[5] 张显辉, 谭长瑛, 陈佩寅. 焊接接头氢扩散数值模拟(I) [J]. 焊接学报, 2001, 12(3): 51—54

[6] Tso-Liang Teng, Chih-Cheng Lin. Effect of welding conditions on residual stresses due to butt welds[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 1998, 75(12): 857—864.

[7] 李萌盛, 谢露, 王丽芳. 斜 Y 型坡口焊接裂纹试验的数值模拟[J]. 压力容器, 2003, 20(1): 18—20, 54.

[8] 赵 亮, 余 刚, 张学元, 等. 氢在钢中低温扩散系数[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2005 17(5): 349—351

作者简介: 蒋文春, 男, 1980 年 2 月出生, 博士研究生。主要从事过程设备先进制造和计算机辅助工程以及微小型过程设备的封装等方面的研究。已发表论文 5 篇。

Email: jiangwenchun@126.com

welded joint of a liquefied petroleum gas spherical tank made of 16MnR steel. The hydrogen diffusion without the effect of welding residual stress was also taken into account and compared. This method provides a reference for mastering the criterion of hydrogen induced cracking of welded joint. The result shows that under the welding residual stress field, the hydrogen diffuses and accumulates toward the higher stress zone, attaining stability through a period of time. There is a low hydrogen concentration value around the heat affected zone, where the residual stress gradient and concentration gradient are formed, which can cause the hydrogen long-range diffusion to the high stress zone.

Key words: hydrogen diffusion; welding residual stress; numerical simulation

Evaporation loss of Mg element in 5A06 aluminium alloy electron beam welding WANG Xing-jun, HUANG Wen-rong, WEI Qi-long, SHEN Xian-Feng (Institute of Machinery Manufacturing Technology, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China). p61—64

Abstract: Distribution of Mg in melt pool and its effect on mechanical properties of weld are investigated in 5A06 aluminium alloy electron beam welding, and the influence of welding parameters on evaporation loss of Mg element is analyzed. The following results are obtained: with the fusion penetration increasing, the content of Mg grows, which means that evaporation loss of Mg reduces, and micro-hardness increases; with increasing of accelerating voltage and beam current, the fusion penetration increases, and the evaporation loss rate of Mg decreases; and with increasing of welding speed, the evaporation loss rate of Mg reduces while fusion penetration diminishes. In order to minimize evaporation loss of Mg, the considerable increasing of accelerating voltage, beam current and welding speed are preferred.

Key words: 5A06 aluminium alloy; electron beam welding; evaporation loss of Mg

Formation of circle band interface of thermosonic flip chip bonding WANG Fu-liang, HAN Lei, ZHONG Jue (School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China). p65—68, 72

Abstract: The thermosonic flip chip bonding has been realized under the pressure constrain pattern of flip chip. Fragment of pad, circle band and ridge have been observed on the bonding interface. The ridge indicates high bonding strength, and fragment of pad indicates remove of interface surface, and the circle band indicates distribution of bonding strength. With the FEA tool, the value and distribution of stress were calculated under different bonding phases, and the formation theory of the circle band interface has been revealed on the term of stress. The edge of bonding interface has better stress conditions for surface remove and atom diffusion, which the primary factor for the formation of circle band interface. And the thermo-sonic vibration changed the distribution of stress and stress

field, which caused the edge of bonding interface in better stress conditions, and promoted the formation of circle band interface.

Key words: thermosonic flip chip bonding; pressure constrain pattern; circle band interface; finite element method

Two-dimension spectrum entropy feature for metal magnetic memory signal DI Xin-jie¹, LI Wu-shen¹, BAI Shi-wu^{1,2}, LIU Fang-ming^{1,2}, XUE Zhen-kui² (1. School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Research Institute of Pipeline, China Petroleum Corporation, Langfang 065000, Hebei, China). p69—72

Abstract: Metal magnetic memory (MMM) is one of the most potential non-destructive testing methods which can diagnose welding crack in early stage. The distribution regularities of metal magnetic memory two-dimension spectrum entropy were investigated in tension test condition with the X70 pipeline steel. Using the feature of amplitude spectrum entropy and braycentre frequency, the support vector machine method can distinguish the different state of stress concentration. With the detection instance, the diagnostic method of stress concentration state in weld was gained. Research shows that the stress concentration state within the ferromagnetic material can be identified by the two-dimension spectrum entropy distribution of MMM signal. It is a base for utilizing MMM to detect the micro-cracks.

Key words: welding crack; metal magnetic memory; two-dimension spectrum entropy

Investigation of welding seam identifying based on force sensing in remote teaching LIU Li-jun^{1,2}, GAO Hong-ming², ZHANG Guang-jun², WU Lin² (1. State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. School of Materials Science & Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China). p73—76

Abstract: Because the identifying precision of welding seam based on vision sensing is too low to meet the requirements of remote welding teaching, the welding seam identifying (WSI) system is designed based on force sensing, which mainly includes the collecting system of WSI signal, software system, the force model and WSI arithmetic. The teaching point is accurately calculated out by the sharp changes of six-dimensional force based on the WSI arithmetic. The experimental results show that the WSI speed is increased, and the precision and efficiency of the remote teaching is improved by WSI arithmetic.

Key words: remote welding; remote teaching; welding seam identifying; force sensing

Effects of different shielding gases on slag detachability of type 347L flux-cored wire for stainless steels containing Nb ZHAO Yan-chao, WEI Qi, LI Zhuo-xin, REN Chun-ling (The College of Material Science and Engineering, Beijing University of