

5A06 铝合金电子束焊接中镁元素的烧损行为

汪兴均, 黄文荣, 魏齐龙, 沈显峰, 雷华东

(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镁元素的分布及其对焊缝硬度的影响, 并分析了焊接参数对镁元素烧损行为的影响。结果表明: 在同一熔池中随着深度的增加, 镁元素含量增加, 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, 熔池熔深增加, 镁元素烧损程度降低; 随着焊接速度增加, 镁元素烧损程度降低, 熔深却减小。为减小镁元素烧损, 在电子束焊接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; 镁元素; 烧损

中图分类号: TG456.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-3738(2006)12-0029-04

Evaporation and Loss of Mg Element in Electron Beam Welding of 5A06

WANG Xing-jun, HUANG Wen-rong, WEI Qi-long, SHEN Xian-feng, LEI Hua-dong

(China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: Distribution of Mg in melt pool and its effects on mechanical properties of seam were investigated in 5A06 alloy electron beam welding (EBW), and influence of welding parameters on evaporation and loss of Mg element was analyzed. With the depth in melt pool increasing, containment of Mg grew, indicating that evaporation and loss of Mg reduced, and micro-hardness increased. With increasing of accelerating voltage and beam current, fusion penetration increased, evaporation and loss of Mg decreased. With increasing of welding speed, evaporation and loss of Mg reduce while fusion penetration diminish. In order to minimize evaporation and loss of Mg, the considerable increasing of accelerating voltage, beam current and welding speed is preferred.

Key words: 5A06 alloy; electron beam welding (EBW); Mg; evaporation and loss

0 引言

5A06 防锈铝合金属于铝-镁系合金, 退火后焊接性、抗蚀性良好, 经冷变形后可提高强度, 已广泛用于中载构件、液体容器和管道等零件中, 由于该合金具有低密度、是电与热的良导体、耐蚀性好、非磁性、反射性和阳极氧化性等综合性能, 因此其薄壁件在某些压力容器中的应用十分广泛; 且能很好地满足电子仪器及其部件轻、薄、短、小的要求, 因此在电子工业中的应用也日益扩大^[1]。

与钨极氩弧焊相比, 采用真空电子束焊接铝合金时, 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, 接头的力学性能好。但是由于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 ℃以上), 而该合金在焊接熔化过程中, 由于镁的沸点(1 380 K)低于铝的沸点(2 723 K), 且镁的沸点与铝的熔点(933 K)仅差 447 K, 所以在高温熔池中, 镁元素将有一部分成为金属蒸气并逸出熔池。而在该合金中镁是主要强化元素, 镁含量的变化将影响合金多方面的性能^[2]。然而有关电子束焊接时镁元素烧损的研究报道较少, 因此作者结合某型号压力容器的生产, 研究了 5A06 铝合金电子束焊接时焊缝中镁元素含量的变化规律及其对材料硬度的影响。

1 试样制备与试验方法

1.1 试样制备

试验用 5A06 铝合金化学成分(质量分数/%)为: 0.40Si, 0.10Cu, 0.5~0.8Mn, 5.8~6.8Mg, 0.20Zn, 0.001~0.005Be, 0.02~0.10Ti, 0.40Fe, 余为铝。试样加工成环状(ϕ 50 mm×30 mm), 厚度为 1.2 mm。采用德国 ESW1002/7.5-150 型高压高真空电子

收稿日期: 2005-11-28; 修订日期: 2006-02-10

作者简介: 汪兴均(1977—), 男, 重庆梁平人, 硕士研究生。

导师: 黄文荣研究员

束焊机进行焊接。共使用 11 个试样,其中 9 个为正交试验试样,另外 2 个分别为镁含量分布试样和硬度分布试样。所有试样焊接时工作距离、函数形状和函数频率相同,其值分别为 330 mm、O 形、1 kHz。作者采用 3 因素 3 水平的正交试验以考察电子束焊接时加速电压、束流和焊接速度对镁元素烧损的影响。试验选用正交表 $L_9(3^4)$ 安排试验,试验因子水平见表 1,水平 1、2、3 的值约按 10% 递增。镁含量分布试样的加速电压、束流和焊接速度为:100 kV、1.87 mA、10.43 mm · s⁻¹;硬度分布试样的为:100 kV、1.96 mA、13.33 mm · s⁻¹。

表 1 正交试验因子水平表
Tab. 1 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	14.60
水平 3	100	1.96	16.50

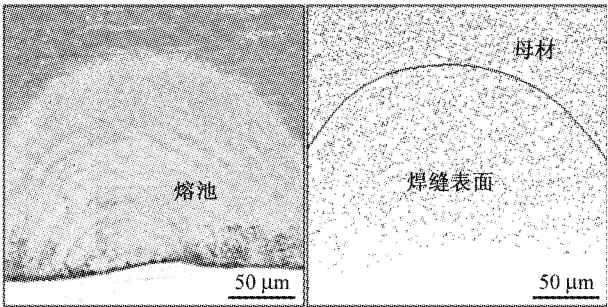
1.2 试验方法

用 NORAN System 6 型 X 射线能谱仪分析焊缝熔池不同深度位置的镁元素含量及分布。用 MHV2000 型数显显微硬度计测试焊缝显微硬度,载荷 0.98 N,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,此时选用了 9 个正交试验试样中的 3 个进行比较。

2 试验结果与分析

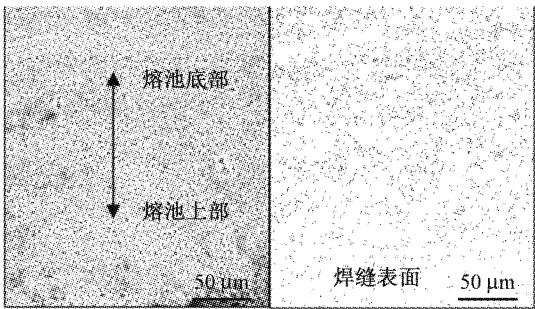
2.1 镁元素在熔池内的分布

由图 1 可见,熔池中镁含量尤其是焊缝表面含量较母材明显降低。结合图 2 可见,随着深度的增加,镁含量增加,即在焊缝表面元素烧损比内部更大。



(a) 熔池被扫描区域形貌 (b) 被扫描区域镁含量分布
图 1 整体熔池镁含量面扫描分布

Fig. 1 Surface scanning distribution of Mg containment in melt pool
(a) micrograph of scanning zone (b) distribution of Mg



(a) 熔池被扫描区域形貌 (b) 被扫描区域镁含量分布
图 2 局部熔池镁含量分布

Fig. 2 Surface scanning distribution of Mg containment in segment of melt pool

(a) micrograph of scanning zone (b) distribution of Mg

图 3 为镁含量分布试样能谱分析采样点示意,由表 2 可见,镁含量随着熔池中深度的增加而增加。愈靠近表层,烧损情况愈严重,熔池中镁元素含量与母材相比相差更大。

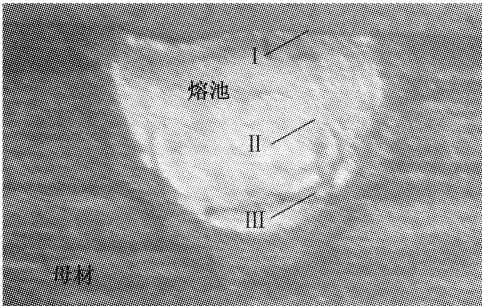


图 3 能谱采样点示意

Fig. 3 Schematic diagram of EDS sampling points

表 2 试样各采样点镁含量

Tab. 2 Mg containment of sampling points

采样点编号	I	II	III	母材
质量分数/%	1.43	1.47	2.57	6.35
原子分数/%	1.58	1.63	2.85	7.00

2.2 镁元素烧损对焊缝硬度的影响

为考核 5A06 铝合金焊缝的力学性能,用焊缝的硬度来间接反映,一般是硬度越高,其强度越大^[3]。图 4 为硬度分布试样焊缝横截面显微硬度各测试点的压痕,结合图 5、图 6 可见,焊缝熔化区硬度明显低于母材,且在焊缝熔池内部随着深度的增加显微硬度增加。由于镁元素在合金中起主要强化作用,结合前述镁元素在熔池中的分布规律可知造成这种现象的原因是:熔池内镁元素存在一定程度的烧损导致显微硬度下降,镁元素烧损程度越高,硬度降低越明显。

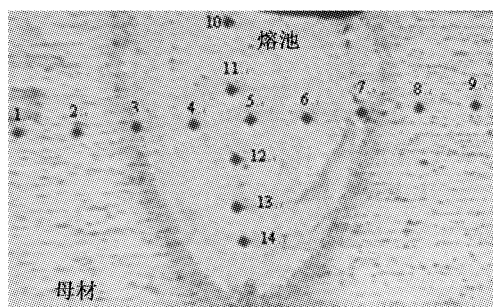


图4 显微硬度各测试点的压痕

Fig. 4 Dents of microhardness test

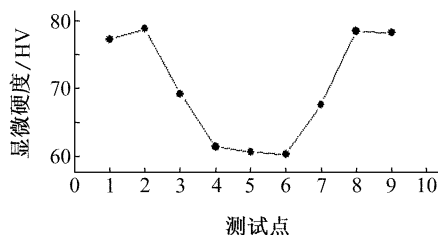


图5 焊缝横向显微硬度分布

Fig. 5 Microhardness distribution along horizontal direction of welding seam

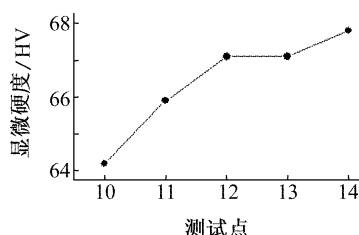


图6 焊缝纵向显微硬度分布

Fig. 6 Microhardness distribution along vertical direction of welding seam

为了减小不同试样母材镁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镁的烧损情况,计算公式如下:

$$\text{烧损率} = \frac{\text{母材镁含量} - \text{焊缝镁含量}}{\text{母材镁含量}} \times 100\%$$

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3可见,随着焊缝镁元素烧损率的增加,焊缝的硬度降低,其原因也是镁元素烧损程度差异造成的。

表3 不同试样烧损率与显微硬度对比

Tab. 3 Comparison of percent evaporation and loss, and microhardness between different samples

试样	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

2.3 焊接参数对镁元素烧损的影响

由表4可得焊接参数对烧损率与熔深影响趋势极差分析图(图7)。可见,加速电压、束流和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、束流和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、束流和焊接速度的增加烧损率降低。

表4 正交试验实施计划及结果

Tab. 4 Orthogonal experiment scheme and experimental data

试验号	加速电压	束流	焊接速度	熔深/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

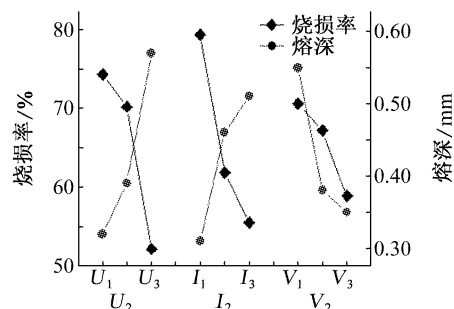


图7 焊接参数对熔深及烧损率影响趋势极差分析

Fig. 7 Trend grading analysis of influence of welding parameters on fusion penetration and evaporation and loss

加速电压越高,电子束功率越高,功率密度也越高,因此熔深也越大^[4];同时,根据熔池动力学,电压升高电子束对熔池的搅拌作用越强^[5,6],即将熔池底部更多的物质带到熔池上部,弥补上部由于烧损而含量减少的合金元素,在一定程度上减小了熔池上部的元素烧损率。

束流的作用与加速电压的作用类似,束流越大,电子束的功率密度越高,因而能够增加熔深,增加对熔池的搅拌作用,因此熔深增加而烧损率减小。

焊接速度的影响则要复杂些,随着焊接速度的增加工件表面单位面积所获得的能量将减小,故使熔深减小;同时由于电子束留驻时间的减少,工件表面镁元素烧损也随之减少,虽此时电子束对熔池的

搅拌时间也减少,但总体表现为元素烧损率减少。

因此在生产中,可以根据对熔深和力学性能的具体要求,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。

3 结 论

(1) 同一试样焊缝熔池内,随着深度的增加镁元素烧损降低,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) 镁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、束流和焊接速度对镁元素烧损影响显著,三个参数的增加均会使镁元素的烧损率

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镁元素的烧损,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] 肖亚庆. 铝加工技术实用手册[M]. 北京: 冶金工业出版社,2005.
- [3] 王希靖. 铝合金 5030 的激光焊接[J]. 甘肃工业大学学报,1994,20(3):7-12.
- [4] 王之康,高永庆,徐 宾. 真空电子束焊接设备及工艺[M]. 北京: 原子能出版社,1990.
- [5] 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.
- [6] 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.

第五届材料与热加工物理模拟及数值模拟国际学术会议第一轮通知

自 1990 年以来,在国家自然科学基金委、王宽城教育基金会、美国 TMS 协会、美国动态科技联合体(DSI)及哈尔滨工业大学的支持下,由中国机械工程学会主办的"材料与热加工物理模拟及数值模拟国际学术会议"在我国已连续举办了四次,会议规模越来越大,论文水平也逐步提高,产生了良好的国际影响。依照 2004 年上海会议的约定,定于 2007 年 10 月 23 日至 27 日在河南郑州(郑州市黄河迎宾馆)举办"第五届材料与热加工物理模拟及数值模拟国际学术会议"。预计将有 30 多个国家的约 300 名代表参加。

会议范围与主题

1. 材料和热加工领域物理模拟与数值模拟的基本理论;2. 在热/力模拟试验机和其他热加工试验设备上进行的物理模拟试验;物理模拟技术在新材料研制和热加工领域(包括压力加工、焊接、铸造、热处理、表面改性及其他新工艺)中的应用;3. 材料研制和材料热加工领域数值模拟及本构方程的建立;产品质量监测、预报及控制;专家系统、人工神经网络技术在材料领域的应用等;4. 物理模拟试验设备的功能开发;5. 数值模拟软件的开发与应用;计算材料学及分子动力学等;6. 材料物理模拟和数值模拟的发展方向,21 世纪展望;7. 应征论文不局限于必须在热/力模拟试验机上所做的试验,凡在材料加工领域(包括纳米技术、高能束、自蔓延、功能材料及梯度材料合成技术等等)用其他试验设备所取得的研究成果均可在会上交流;8. 所涉及的材料不仅是金属材料,非金属材料,如陶瓷、非金属基复合材料、高分子材料等均可应征。会议语言为英语,所有被会议接受的论文均被收录在会议论文集中,本着自愿的原则,推荐在国外刊物《Materials Science Forum》(材料科学论坛)上发表,该刊物上的文章将全部被 SCI、EI 收录双检。

重要日期:论文摘要(英文 250 个单词,并译成中文)截止日期:2007 年 2 月 1 日;论文全文(A4 纸不超过 6 页,Word 小四号或五号字)截止日期:2007 年 7 月 1 日;会议注册登记表:请于 2007 年 2 月 1 日前寄出。

组委会联系方式:会议网址:<http://nsmf.hit.edu.cn>。组委会主席牛济泰教授或会议秘书金成博士联系方式为:哈尔滨工业大学 436 信箱,邮编:150001;电子信箱:jtn@hit.edu.cn;电话(牛济泰):0451-86413373, 13069701316;传真:0451-86413373。电话(金成):0451-86419232, 86413671,手机:13633611072。