LF2 铝合金与 Q235 钢加入中间 Cu 层电子束 焊接接头组织及形成机理

张秉刚, 何景山, 曾如川, 冯吉才 (哈尔滨工业大学现代焊接生产技术国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

摘 要: 对 2 mm 厚的 LF2 铝合金和 Q235 钢平板试件进行了加入中间过渡层金属 Cu 的电子束对接焊接试验,利用光学金相、扫描电镜及能谱分析等方法研究了接头各区域 的组织结构和成分分布。结果表明,接头可分为三个焊缝组织区域,其中靠近钢侧的焊 缝区主要为 Fe 基固溶体,并含有少量金属间化合物;靠近铝侧的焊缝区为含有 Fe-Al 系及 Al-Cu 系金属间化合物的 Al 基固溶体;焊缝中部区为呈层带状分布的多种 Fe-Al 以及 Al-Cu 脆性金属间化合物混合区。分析认为虽然引入了铜过渡层,但在焊缝中 依然有较多金属间化合物生成,特别是焊缝中部区域上,呈连续层带状分布的多种脆性 金属间化合物的产生是影响接头强度的主要因素。在对接头组织结构分析的基础上, 建立了描述 LF2/Q235 异种金属电子束对接接头形成过程的物理模型。



关键词: 电子束焊接; 异种金属; 接头组织

中图分类号: TG401 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2007)06-037-04

张秉刚

0 序 言

钢作为异种金属结构中的常用材料,具有一系 列优良的物理及力学性能。铝合金作为常用轻质有 色金属材料,以其密度小、比强度高,良好的导电、导 热性及耐蚀性等优点在工业制造中获得了广泛的应 用。因铝钢异种金属结构整体的轻质、高强及良好 导热导电性能,除了已在航空制造等领域得到应用 外,在船舶建设中亦有不少关于钢质船主体与铝合 金部件之间的连接。特别是在民用汽车行业,更是 得到了广泛关注,显示出良好的应用前景^[1]。

铝合金与钢之间物理及化学性能具有显著差 异,这给熔焊带来了很大困难。焊接时易在接头区 生成大量的 Fe-Al 脆性金属间化合物,给接头强度 带来不利影响^[3]。目前国内外关于铝合金和钢之间 的连接主要集中在扩散焊、摩擦焊等固相连接方面, 而熔化焊接研究则鲜见报道^[3-9]。针对电子束焊接 具有能量密度高、加热速度快、焊接热影响区及变形 小、参数稳定再现性好、能量易于控制及适于焊接难 熔及异种金属等一系列的优点^[6-8],采用以铜箔来 作为中间过渡层,对铝合金与钢进行了电子束对接 焊接试验。分析了接头的组织结构及成分分布,建 立了铝合金与钢电子束焊接接头形成的物理模型, 并对其形成过程进行了分析。这为合理制定铝合金 与钢的焊接工艺,获得其优质连接提供了理论和试 验储备,对进一步推动铝钢轻量化结构的应用具有 重要的理论及现实意义。

1 试验材料及方法

试验所选用的材料为 2 mm 厚的 LF2 铝合金和 Q235 钢,其化学成分及物理性能分别如表 1,表 2, 表 3 所示。接头处夹层金属为 100 ^μm 厚的 Cu 箔。

表 1 LF2 铝合金的化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of LF2 aluminium all	ѹ
---	---

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	$Si\!\!+\!Fe$	Ti	Al
0.40	0.40	1.10	0.15~0.40	2. 0~ 2. 8	0.60	0.15	余量

表 2 Q235 钢的化学成分(质量分数,%)

Table 2 Chemical composition of Q235 steel

С	Mn	Si	S	Р	Fe
0. 12 ~ 0. 20	0.30~0.70	≤0.30	≪0.045	≪0.045	余量

试验用焊接设备为法国 TECHMETA 公司生产的MEDARD45型真空电子束焊机,焊机最大加速电

收稿日期: 2007-02-12

基金项目:中国博士后科学基金资助项目(20060390785)

表 3 LF2 铝合金与 Q235 钢的物理性能 Table 3 Physical properties of LF2 and Q235

材料	熔点 7 _/ ℃	热导率 λ/(W∘m ⁻¹ ∘K ⁻¹)	密度 안(g°m ⁻³)	线膨胀系数 α _ℓ / (10 ⁻⁶ •K ⁻¹)
LF2	649	140.0	2. 68	23.8
Q235	1 500	77.5	7.86	11.7

压 60 kV, 最大功率 6 kW, 试验所使用的阴极直径为 \$\phi_2.0 mm。先对待焊试件及夹层金属进行基本的焊 前处理。将清理好的铝合金与钢试件底面平齐沿长 边对接放入焊机真空室工作台上的自制夹具中, 在 接头中间加入尺寸与接触面大小一致的中间层金属 Cu 元素, 锁紧夹具使接触面紧贴压靠, 然后在真空 度为 5.4×10⁻² Pa 下进行焊接。焊后选取接头试样 进行光学金相、扫描电镜及能谱分析, 以确定接头各 区域组织和成分。

2 结果与讨论

2.1 接头组织

图1为 LF2 铝合金和 Q235 钢电子束对接接头的整体形貌。由图可见,接头中形成了三个焊缝区域,为了研究方便将靠近 Q235 钢母材一侧的焊缝区域定义为焊缝 A 区,将靠近 LF2 铝合金母材一侧的焊缝区域定义为焊缝 B 区,中间黑带状的区域定义为焊缝 C 区。



图 1 LF2/Q235 电子束焊接接头宏观形貌 Fig. 1 Macrostructure of EBW joint of LF2/Q235

由图 2 的焊缝不同区域组织形貌可见, A 区呈 固溶体组织形态, C 区呈不规则的条带状, 且将 A 区 与 B 区分割开来, B 区内有颗粒及枝晶态组织出现。 进一步对各区主要组元 Fe, Al, Cu 的元素线分布测 试结果如图 3 所示。由图 3 可以看出, 在整个焊缝 A 区内, Fe 元素作为 A 区的基体元素, 含量保持在 70%左右不变, Al 元素为 20%左右, Cu 元素占 7% 左右。结合主要组元之间的相图及其在 A 区的分 布情况, 可知在 A 区中必有 Fe—Al 系和 Al—Cu 系 金属间化合物生成,可推断 A 区为内有少量 Fe⁻⁻ Al 和 Al⁻⁻ Cu 金属间化合物的 Fe 基固溶体组织,如图 2a 所示。



(a) 焊缝A区组织



(b) 焊缝C区组织



(c) 焊缝B区组织

图 2 LF2/Q235 电子束焊缝不同区域微观组织

Fig. 2 Microstructure of different zones in weld of LF2/ Q235 for EBW

在整个焊缝 C 区中, Fe 元素降低到40%左右后 稳定不变, Al 元素的含量则以一个渐变的趋势从 20%左右增加到 80%左右。此外, Cu 元素在刚进入 焊缝 C 区的时候急剧地上升到 20%, 然后降低到 2%左右。在该区各组元的分布变化幅度较大, 说明 有多种生成相。结合各组元间相图可进一步推断, 该区为 Fe-Al 和 Al-Cu 多种金属间化合物混合 区。由图 2b 可见, C 区内所生成的金属间化合物呈 层带状连续分布, 这使得该区域成为整个接头最薄 弱的部位。

在焊缝B区中,沿着远离C区的方向Al元素



图 3 LF2/Q235 电子束焊缝区元素线分布



的分布急剧上升并成为主体元素,而Fe元素急剧下降。这是由于B区离下束点较远,虽然该区也发生 了熔化,但是并没有直接参与到电子束的搅拌中去, 因而整个B区呈相对静止和稳定状态。B区中因 Fe原子和Cu原子的扩散和迁移会生成Fe-Al及 Al-Cu金属间化合物,它们以细小的颗粒及枝晶态 存在于Al基固溶体中,如图2c所示。

2.2 接头形成过程

在上述组织结构分析的基础上,结合电子束焊 接异种金属材料的特点,建立了描述LF2/Q235异种 金属电子束对接接头形成过程的物理模型。

图4为LF2/Q235异种金属电子束对接接头初



图 4 LF2/ Q235 电子束对接接头示意图 Fig. 4 Sketch of EBW butt joint of LF2/ Q235 始模型。首先作如下定义,在模型里将对应焊缝 A 区和焊缝 C 区所处位置的熔池定义为主熔池区,而 将焊缝 B 区位置处熔池定义为辅助熔池区。经过 前面对各焊缝区域的成分和组织分析,认为焊接时 整个接头的形成过程可大致分为以下 3 个阶段。 2.2.1 接头区金属熔化阶段

当电子束作用到对接接头中心线处时,由电子 动能转变而来的热能迅速使夹在接头中间的Cu 箔、 靠近接头的一部分Q235 母材以及靠近接头区的一 部分LF2 母材发生熔化,如图 5 所示。





这三部分材料熔化之后在电子束的搅拌作用下 混合形成接头区域中的主熔池。同时,由于 LF2 铝 合金具有高的热导率和较低的熔点,主熔池区中的 热量迅速地被传递到距离接头对中线较远处的 LF2 母材使其发生熔化,从而成为辅助熔池。

2.2.2 熔池内反应阶段

在主 熔池中, 熔化了较多的 Q235 母材、部分 LF2 母材以及所添加的 Cu 箔。由于 Fe 元素比重较 大, 在主熔池中占有主导地位, 因此在主熔池中主要 生成 Fe 基固溶体。因 Fe—Al—Cu 三者之间的相互 反应, 会有部分 Fe—Al 金属间化合物及少量 Al—Cu 金属间化合物生成, 而辅助熔池则并没有直接参与 主熔池反应, 如图 6 所示。





但由于辅助熔池与主熔池之间以液态形式接触,所以在两熔池之间必然发生 Fe, Al, Cu 这三种元

素的扩散和迁移,部分 Fe 元素和 Cu 元素以扩散或 者迁移的方式从主熔池进入到辅助熔池,并与里面 的 Al 元素发生反应生成 Fe-Al 金属间化合物和 Al -Cu 金属间化合物,如图 7 所示。



图 7 原子扩散迁移反应阶段

Fig. 7 Phase of reaction of atomic diffusion and migrating

2.2.3 熔池凝固阶段

随着电子束的向前移动, 熔池温度迅速降低, 熔 池内各元素原子的活性也逐渐降低, 主熔池逐渐由 搅动状态趋于平静, 随后冷却凝固形成了一个均匀 而致密的混合组织, 成为焊缝 A 区。随着 A 区的形 成, 在主熔池结晶过程中在 Fe 基固熔体相的前沿会 形成富 Cu 元素的液相, 加之电子束搅拌不充分, 而 使靠近辅助熔池一侧的主熔池局部区域冷却凝固 后, 生成一条在成分和组织结构上都区别于主熔池 其它区域的层带状组织, 成为焊缝 C 区, C 区中 Cu 元素的含量明显高于其它区域。在辅助熔池中扩散 和迁移得到的 Fe, Cu 原子与 Al 原子发生反应, 冷却 凝固后其基体还是 Al, 但是有部分生成的 Fe-Al 以 及 Al-Cu 金属间化合物以颗粒及枝晶的形态分布 其中, 成为焊缝 B 区。完全凝固后整个接头的焊缝 形貌如图 8 所示。



图 8 凝固后接头焊缝全貌

Fig 8 Whole appearance of joint after solidification

3 结 论

(1) 铝钢电子束焊接接头区组织宏观分布不均 匀, 可以见到明显差异的组织形态分区。其中, 靠近 钢侧的焊缝区主要为 Fe 基固溶体, 并含有少量金属 间化合物; 靠近铝侧的焊缝区为内有 Fe-Al 系及 Al -Cu 系金属间化合物的 Al 基固溶体; 焊缝中部区 为呈层带状分布的多种 Fe-Al 以及 Al-Cu 脆性金 属间化合物混合区。

(2)虽然引入了铜过渡层,但在焊缝中依然有 较多金属间化合物生成。特别是焊缝中部多种脆性 金属间化合物呈连续层带状分布使其成为整个接头 最薄弱区域,导致接头性能下降。

(3)建立了接头形成的物理模型,分析认为 LF2 与 Q235 夹铜过渡层电子束焊接接头的形成过程是 由接头金属发生熔化、熔池内部发生反应以及熔池 冷却凝固这三个主要阶段组成的。

(4) 控制金属间化合物的分布、形态与数量是 提高铝钢电子束焊接接头性能的主要因素。

参考文献:

- [1] 李亚江,王 娟,刘 强.异种难焊材料的焊接及应用[M].
 北京:化学工业出版社,2004.
- [2] 何康生,曹雄夫.异种金属焊接[M].北京:机械工业出版社, 1986.
- [3] Daglilar Sibel, Topuz Ahmet, Sonmez Nisan, Diffusion welding of stainless steel with an A1-Mg-Si alloy[J]. Praktische Metallographie/ Practical Metallography, 1995, 32(10): 496-505.
- [4] Shinoda Takeshi, Ogawa Masafumi, Endo Seiichi. Friction welding of aluminum and plain low carbon steel[J]. Welding Research Abroad, 2000, 46(12): 27–30.
- [5] Joo Sung-Min, Kim Young-Pyo, Bang Han-Sur. Welding of steel and aluminum by Nd-YAG laser[J]. Key Engineering Materials, 2004, 270–273(111): 2389–2394.
- [6] 周广德. 电子束焊接技术的特点与应用[J]. 新技术应用, 1993 (4): 25-30.
- [7] College R R. Electron beam welding [J]. Tooling & production, 1974 (6): 66-67.
- [8] Sun Z, Karppi R The application of electron beam welding for the joining of dissimilar metals: an overview [J]. Journal of Materials Technology, 1996, 59(3):257-267.

作者简介:张秉刚,男,1971年出生,博士,讲师。主要研究方向 为新材料及异种材料电子束焊接。发表论文 20余篇。

Email: zhangbg@hit.edu.cn

Microstructures and formation of EBW joint of aluminum alloy LF2 to steel Q235 with transition metal Cu ZHANG Binggang, HE Jingshan ZENG Ruchuan FENG Jicai (State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China).p37-40

Abstract: Butt welding of dissimilar metal between Al alloy LF2 and carbon steel Q235 with the middle transition metal of Cu was carried out by electron beam welding. The microstructures, elements distribution in the joint were investigated by means of optical micrography, SEM and EDX. The result showed that the macrostructure in the joint can be divided into three zone. One is Fe based solid solution with a small amount of intermetallic compounds at the weld zone near to steel side. One is Al based solid solution with a definite store of Fe- Al and Al- Cu intermetallic compounds at the weld zone near to aluminium alloy. The other is mixed intermetallic compounds zone which consists of the several kinds of Fe-Al and Al-Cu intermetallic compounds at the middle weld, and its distribution is layered and banded. The analysis indicated that more intermetallic compounds were made in the weld although the transition metal Cu was used, particularly the multiple bedded and zonal intermetallic compounds formed and distributed in the middle weld are the main factor to influence the strength of the joint. Based on the analysis on microstructure of the joint, the physical model was founded to describe the forming process of dissimilar metal joint between Al alloy LF2 and carbon steel Q235 with transition metal Cu by EWB.

Key words: dissimilar metals; electron beam welding; microstructures of joint

Effects of activating fluxes on AC A-TIG weld penetration of magnesium alloy HUANG Yong, FAN Ding, YANG Peng, LIN Tao (State Key Laboratory of Gansu Advanced Non-ferrous Met al Materials, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China). p41—44

Abstract: AC A-TIG welding experiments of magnesium alloy were carried out to study the effects of surface activating fluxes on weld penetration. Elements including Te, Ti and Si, oxides including SiO₂ TiO₂ and V₂O₅, halides including MnCl₂, CdCl₂ and ZnF₂ were used as activating fluxes, respectively. It is found that, Te powder, ZnF2 and CdCl2 all can increase weld penetration dramatically. Especially for Te powder, weld penetration reaches 1.6 times of that of conventional TIG welding. Weld depth width ratio reaches 0.43. Ti powder has little effect on weld penetration and weld width. All V2O5, SiO2, TiO2, MnCl2 and Si powder decease weld penetration and weld width. Among the three activating fluxes improving weld penetration obviously, both Te powder and ZnF2 refine weld grain. CdCl₂ coarsens weld grain a little. The results indicate that, electron adsorption with activating flux particles of Te powder, ZnF2 and CdCl2 can constrict arc and increase weld penetration of AC TIG welding of magnesium alloy.

Key words: magnesium alloy; alternating current activating tungsten inert-gas welding; activating flux; weld penetration

Microstructure and properties near interface zone of diffusionbonded joint for Mg/ Al dissimilar materials $IIU Peng^{1}$, II Yajiang^{2 3}, WANG Juan²(1. Key Laboratory for Advanced Materials Processing Technology, Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Key Laboratory of Liquid Structure and Heredity of Materials, Ministry of Education, Shandong University, Jinan 250061, China; 3. State Key Laboratory of Advanced Weldirg Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China), p45–48

Abstract The interface zone of Mg/Al diffusion-bonded joint is constituted with Al transition layer (Mg₂Al₃ phase), middle diffusion layer (MgAl phase) and Mg transition layer (Mg₃Al₂ phase). Some diffusion holes exist between the Al transition layer and middle diffusion layer observed by SEM. It is unfavorable to obtain diffusion-bonded joint of good performance. With the increase of heating temperature the shear strength of joint interface shows the trend of increasing firstly and then decreasing. The highest shear strength is about 18.94 MPa when the heating temperature is 475 $^{\circ}$ C, holding time is 60 min and pressure is 0.081 MPa. The microhardness test indicated that the microhardness of diffusion zone is about 260–350 HM. However, and the diffusion zone exist three different hardness regions. With the increase of heating temperature, the microhardness and diffusion width of interface diffusion zone increase gradually.

Key words: Mg/Al dissimilar materials; vacuum diffusion bonding; microstructure; shear strength

Plasma deposition dieless manufacturing of turbine parts: thermal stress control and process optimization Wu Shengchuan¹, ZHANG Hai' ou¹, WANG Guilan², XIONG Xinhorg² (1. State Key Laboratory of Digital Manufacturing Equipment and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. State Key Laboratory of Material Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China). p49– 52, 56

Abstract Plasma deposition dieless manufacturing (PDM) is a rapid heating and solidification process, in which how to avoid cracks and distortions is a key problem. Therefore, a full understanding on the evolution of temperature field variables is essential to achieve a steady state and robust PDM process. To explore the thermal behaviors of this process, the preheated and water-cooled programs for the fabrication of superalloy turbine parts have been designed respectively. Their temperature fields are then evaluated numerically by finite element method. Analysis results show that the water-cooled scheme exhibits lower hot crackability and better formability, which coincides well with experimental results. The stress distributions are further analyzed with the optimized scanning path based on the water-cooled scheme above. Computational results indicate that reasonable process-cooled conditions can reduce peak stresses and the temperature and stress gradients, and also demonstrate the feasibility and validity of this approach. More importantly, the watercooled scheme can be easily implemented and remarkably improves the possibly-intended formability of the PDM.

Key words: plasma deposition dieless manufacturing; high energy density beam; stress distribution; finite element method; hot crack ability