

# 镁合金 AZ31B 钎焊接头的钎缝物相及力学性能

Phase of Brazing Seam and Mechanical Properties of Magnesium Alloy AZ31B Brazed Joint

马 力, 贺定勇, 王立志, 蒋建敏, 李晓延  
(北京工业大学 材料科学与工程学院, 北京 100124)

MA Li, HE Ding-yong, WANG Li-zhi, JIANG Jian-min, LI Xiao-yan (School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**摘要:** 以 Al 基钎料对变形镁合金 AZ31B 进行了高频感应钎焊, 研究了变形镁合金 AZ31B 钎焊接头的钎缝物相和力学性能。采用扫描电镜、X 射线衍射仪、X 射线能谱分析仪等分析了接头的界面组织及钎缝生成相, 测试了接头的抗拉强度及界面生成相的显微硬度。结果表明: 钎缝中钎料与母材发生界面反应生成  $\alpha$ -Mg、 $\beta$ -Mg<sub>17</sub>(Al, Zn)<sub>12</sub> 相。钎焊搭接接头平均剪切强度为 27MPa, 对接接头平均抗拉强度为 42MPa。对接接头断口的主要断裂形式为沿晶脆性断裂, 断裂主要产生在  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>(Al, Zn)<sub>12</sub> 硬脆相处。

**关键词:** AZ31B; Al 基钎料; 感应钎焊; 接头强度

**中图分类号:** TB332      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-4381(2008)09-0067-04

**Abstract:** Induction brazing of wrought magnesium alloy AZ31B using Al matrix filler metal was investigated. Both the phases of brazing seam and the mechanical properties of brazed joint were studied. The interface structure and formation phase of brazing seam of the brazed joint were investigated by scanning electron microscopy, X-ray diffraction and X-ray electron probe microanalysis. The tensile strength of joint and the microhardness of the formation phases were also tested. The results show that Al matrix filler metal has reacted with the base metal and  $\alpha$ -Mg,  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>(Al, Zn)<sub>12</sub> phases have been produced in brazing seam. Average tensile strength of the butted joint reached 42MPa and average shear strength of the overlapped joint reached 27MPa. The joint mainly exhibits intergranular fracture mode and the fracture comes from  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>(Al, Zn)<sub>12</sub> hard brittle phase.

**Key words:** AZ31B; Al matrix filler metal; induction brazing; joint strength

镁及其镁合金钎焊方法主要有火焰钎焊、炉中钎焊、浸沾钎焊等<sup>[1-6]</sup>。与其它金属相比镁及其镁合金的钎焊较困难, 其原因在于镁对氧的亲合力极大, 成为钎焊时主要障碍之一<sup>[2]</sup>。近十几年来, 由于镁合金的用量增多, 特别是作为汽车、航空用轻质先进结构材料—高强镁基复合材料的出现, 再次引发了人们对镁合金钎焊研究的热情。钎料常使用主组元和母材的基本金属相同的共晶类合金<sup>[3]</sup>。通常, 镁合金的钎焊在接头强度要求不高的场合采用软钎焊, 对接头强度要求比较高时则采用硬钎焊。美国焊接学会编写的《钎焊手册》列举的目前可用于镁合金钎焊的商业钎料有: BMg-1, BMg-2a (美国试验材料学会牌号分别是 AZ92A 和 AZ125A)。但这两种钎料熔点比较高, 钎焊温度在 600℃左右, 配以的钎剂熔点温度也较高(约 538℃), 超过大多数镁合金的燃点及熔点温度, 因此它

只适于钎焊少量几种镁合金, 并不适于钎焊熔点低的镁合金<sup>[4,5]</sup>。日本新濠大学 Watanabe 教授等研发了用于钎焊 AZ31B 镁合金的低熔点钎料<sup>[7,8]</sup>, 钎料熔点小于 480℃, 主要化学成分(质量分数/%)为 In-34.5Mg-(0.2-6.4)Zn-0.8Al。但该钎料 In 用量太大, 价格昂贵, 且不易获得。所以低中温、价格低廉、易获得的镁合金钎料的开发就成为了一个重要研究方向。本工作采用自行研制的一种 Al 基钎料对变形镁合金 AZ31B 进行了高频感应钎焊。分析了钎焊接头的钎缝物相和力学性能, 研究了钎焊接头断裂的原因。

### 1 实验材料及方法

本实验在氩气保护的条件下进行高频感应钎焊, 采用 SP-35AB 高频感应加热装置加热, 氩气流量为

5mL/s。母材采用热轧 AZ31B 变形镁合金板材,板厚 3 mm, AZ31B 的固相点温度为 566 ℃,液相点温度为 627 ℃, AZ31B 变形镁合金的化学成分如表 1 所示。钎焊接头试样尺寸按 GB11363—89 执行,试样尺寸大小为 80mm×24mm×3.3mm。本实验钎料熔炼在 SG2-7.5-12 型坩埚电阻炉中进行。熔炼完成后,在金属型中浇注成型。钎料化学成分为 Al29.7Mg-13.7Zn,采用 WCR-DTA 差热分析仪测得钎料固相点温度为 448 ℃,液相点温度为 463 ℃。

表 1 AZ31B 镁合金化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical composition of AZ31B magnesium (mass fraction/%)

Mg	Al	Zn	Mn	Si	Ni	Fe
Bal	2.5-3.5	0.5-1.5	0.2-0.5	0.10	0.005	0.005

采用 QJ201 作为钎焊的钎剂, QJ201 的化学成分为  $KCl+32LiCl+10NaF+8ZnCl_2$ , QJ201 的熔点范围为 460~620 ℃。本实验钎焊温度为 490~530 ℃,钎焊时间为 2min,焊后焊件持续通氩气保护冷却至室温,用清水冲洗掉钎剂。用 HXD-1000 显微硬度计测试钎焊接头界面的显微硬度。用 MAGIX-PW2403 型 X 荧光光谱分析仪分析钎缝化学成分。用 OLYMPUS-PMG30 光学显微镜、JEOLJSM 6500F 型扫描电镜(配 EDS)和 D8ADVANCE 型旋转阳极 X 射线衍射分析仪对钎焊接头界面微观组织、钎缝相组成进行分析,钎焊接头的力学性能测试用 MTS-810 材料测试系统。

2 实验结果与讨论

2.1 钎焊接头组织分析

钎焊接头的界面组织如图 1 所示,扩散区(黑色)和母材(浅黑色)之间形成了比较明显的界限。界面区中的金属间化合物(浅灰色)向母材侧呈枝状生长。钎

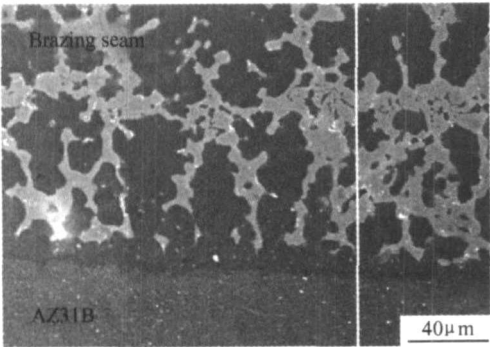


图 1 钎焊界面组织

Fig. 1 Interface section microstructure of brazing

缝中心区有不连续网状分布的粗大金属间化合物生成,主要分布在基体(黑色)的晶界处。

钎焊接头的元素线扫描像(图 1 中白线位置)如图 2 所示。从图 2 可以看出,在钎缝侧金属间化合物处 Mg 的含量下降,在基体内 Mg 含量要高于金属间化合物的 Mg 含量,基本和母材侧的 Mg 含量相当,说明母材侧的 Mg 在钎焊过程中已经向钎缝侧的液态钎料溶解。钎缝侧 Al 含量比母材侧的 Al 含量高,钎缝侧 Al 元素则主要分布在金属间化合物上,一部分与 Mg, Zn 形成金属间化合物相,另一部分则固溶在基体中。Zn 在整个元素线扫描图中分布较分散且含量少,在钎缝侧金属间化合物上 Zn 含量略高,钎缝侧基体处 Zn 含量低于金属间化合物处 Zn 含量,母材侧 Zn 含量很少。表明钎缝侧扩散到母材中的 Zn 元素很少。

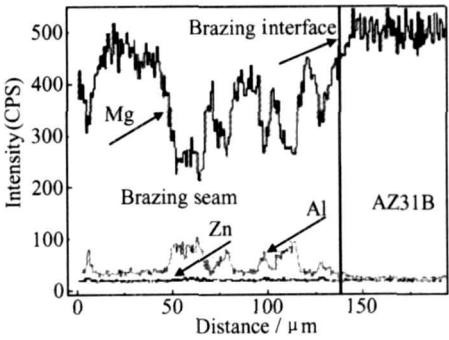


图 2 钎焊界面线扫描像

Fig. 2 Element line scanning images of interface section

2.2 钎焊接头钎缝物相分析

钎焊后钎缝化学成分(质量分数/%)为 Mg-18.0Al-4.0Zn。说明钎料在钎焊被加热熔化过程中,母材侧的 Mg 大量溶解进钎料形成钎缝组织。从而导致钎焊接头中的 Mg 含量上升,Al, Zn 相对含量下降。钎焊接头的 XRD 分析结果如图 3 所示,钎缝的组成相为 α-Mg, β-Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>。由 Mg-Al 二元合金相图可

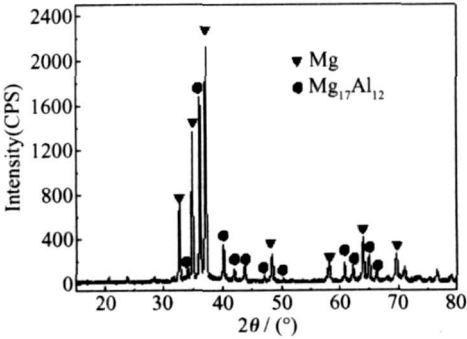


图 3 钎缝 XRD 图谱

Fig. 3 XRD patterns of brazing seam

知<sup>[9]</sup>, 钎缝中的两种主要元素 Mg, Al 焊后冷却时将在 437℃ 发生由液相转变为  $\alpha\text{-Mg}$  和  $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  的共晶反应  $L \leftarrow \alpha\text{-Mg} + \beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ <sup>[10, 11]</sup>。在此温度下 Al 在 Mg 中的溶解度最大, 达到 12.7%, 共晶点成分含 32.3% Al。随着温度的下降 Al 在 Mg 中的溶解度降低, 100℃ 时降为 2.6%。Mg-Al 合金固液两相区的温差较大, 且  $\alpha\text{-Mg}$  是密排六方晶体结构, 使得合金元素在  $\alpha\text{-Mg}$  基体中的固溶率低, 易发生非平衡凝固而形成不连续网状分布的离异共晶体组织, 共晶体组织中  $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  相分布在从共晶体中先析出的  $\alpha\text{-Mg}$  的晶粒边界上。

钎缝的 SEM 照片及 EDS 分析如图 4 所示, 图 4 中 A 处基体 EDS 分析 Mg: Al: Zn 原子摩尔比为 92.68: 6.79: 0.53, A 处即为  $\alpha\text{-Mg}$ ,  $\alpha\text{-Mg}$  中固溶有 Al, Zn。图 4 中 B 处金属间化合物相 EDS 分析 Mg: Al: Zn 原子摩尔比为 62.94: 30.38: 6.68, 其中 Mg: Al 原子摩尔比和  $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  相中 Mg: Al 的原子摩尔比相比偏高。这是由于在微米尺度的 EDS 分析中, 会带入  $\alpha\text{-Mg}$  基体的信息, 镁合金属于轻合金, 在能谱分析时梨状效应的区域会增大, 因而增加带入基体  $\alpha\text{-Mg}$  信息的机会, 但这与 XRD 分析结果判定的  $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  相并不矛盾。而 B 处 Mg: (Al+ Zn) 的原子摩尔比更接近于  $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  相中 Mg: Al 的原子摩尔比。这时  $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  相的化学式可以表示为  $\beta\text{-Mg}_{17}(\text{Al}, \text{Zn})_{12}$ , 实际上  $\beta\text{-Mg}_{17}(\text{Al}, \text{Zn})_{12}$  是  $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  的扩展相<sup>[11, 12]</sup>, 它是  $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  在凝固过程中一部分 Al 被 Zn 取代后形成的。至此钎缝的离异共晶体组织为  $\alpha\text{-Mg} + \beta\text{-Mg}_{17}(\text{Al}, \text{Zn})_{12}$ , 钎缝的组成相为  $\alpha\text{-Mg}$ ,  $\beta\text{-Mg}_{17}(\text{Al}, \text{Zn})_{12}$ 。

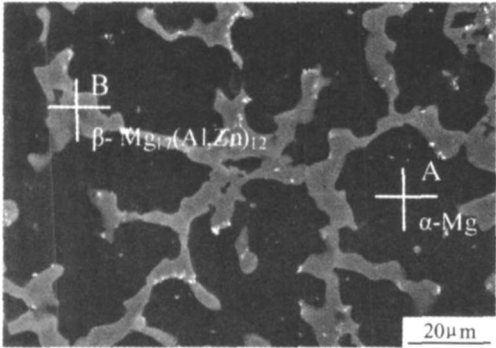


图 4 钎缝 SEM 照片及 EDS 分析

Fig.4 SEM microstructure and EDS analysis of brazing seam

测得母材侧显微硬度平均值为 HV70, 界面平均值为 HV124,  $\beta\text{-Mg}_{17}(\text{Al}, \text{Zn})_{12}$  相平均值为 HV183,  $\alpha\text{-Mg}$  基体上平均值为 HV127, 可见以不连续网状形式存在  $\beta\text{-Mg}_{17}(\text{Al}, \text{Zn})_{12}$  相硬度最高, 母材显微硬度最

低。 $\alpha\text{-Mg}$  基体和界面硬度相当。

2.3 钎接头力学性能分析

实测母材 AZ31B 平均剪切强度为 99MPa, 平均拉伸强度为 263MPa。对接接头平均拉伸强度为 42MPa, 搭接接头平均剪切强度为 27MPa。对接接头的拉伸强度达到母材拉伸强度的 17%, 搭接接头剪切强度达到母材剪切强度的 27%。钎焊对接接头拉伸断口的扫描照片如图 5 所示。从图 5 可以看出断口呈现出许多短而弯曲的撕裂棱, 撕裂棱两边由大小不一的解理台阶构成, 在不同高度的平行解理面之间存在解理台阶<sup>[13- 15]</sup>。这是由于在外力作用下局部应力集中较大, 当应力作用方向有利于沿一定的解理面断裂时, 就会发生局部的解理断裂, 解理裂纹可以穿过强度较低的界面而沿二次解理面扩展成穿过螺旋位错, 形成解理台阶, 对外总体表现为沿脆性断裂。

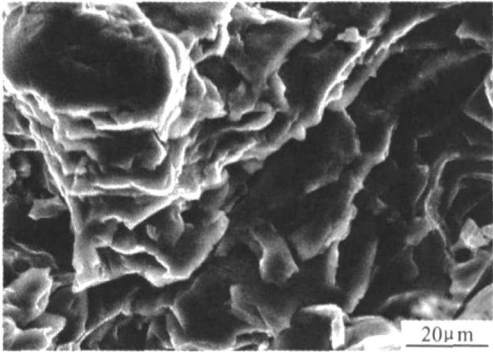


图 5 对接接头断口扫描照片

Fig.5 SEM fractography of butted joint

钎焊对接接头纵剖面断口金相显微照片如图 6 所示。从图 6 可以看出, 接头的断裂位置主要产生在沿  $\alpha\text{-Mg}$  晶界不连续网状分布的粗大  $\beta\text{-Mg}_{17}(\text{Al}, \text{Zn})_{12}$  相处。原因是界面处  $\alpha\text{-Mg}$  中固溶的 Al, Zn 固溶体组织的出现, 起到了固溶强化的作用, 使钎焊接头具有良好的强度和塑性。而钎缝处的  $\beta\text{-Mg}_{17}(\text{Al}, \text{Zn})_{12}$  是

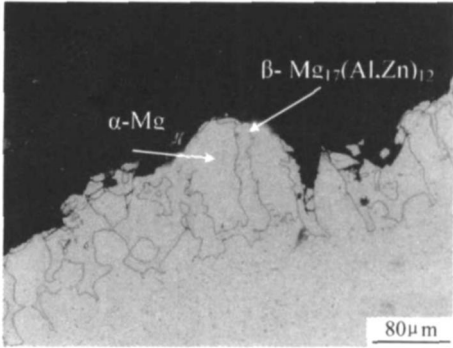


图 6 对接接头纵剖面断口金相显微照片

Fig.6 OM fractography of longitudinal profile of butted joint

Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>的扩展相,只是 $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>中的一小部分Al被Zn取代。 $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>相是硬脆相, $\beta$ -Mg<sub>17</sub>(Al,Zn)<sub>12</sub>相和 $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>相性质相似,也是硬脆相。当钎焊接头受外力产生变形时, $\beta$ -Mg<sub>17</sub>(Al,Zn)<sub>12</sub>相其协调变形能力很低,难以与 $\alpha$ -Mg基体协调一致地变形, $\beta$ -Mg<sub>17</sub>(Al,Zn)<sub>12</sub>相的脆性导致裂纹很容易形成与扩展,同时 $\beta$ -Mg<sub>17</sub>(Al,Zn)<sub>12</sub>相与 $\alpha$ -Mg基体在界面处由于受到外力作用时易产生应力集中,在应力集中的作用下,使得硬脆 $\beta$ -Mg<sub>17</sub>(Al,Zn)<sub>12</sub>相沿 $\alpha$ -Mg界面被拉开产生裂纹,从而导致接头拉伸断口表现为较明显的沿晶脆性断裂特性。

### 3 结论

(1) 以Al基钎料在氩气保护条件下可以实现对变形镁合金AZ31B高频感应钎焊,钎缝主要生成相为 $\alpha$ -Mg, $\beta$ -Mg<sub>17</sub>(Al,Zn)<sub>12</sub>。钎焊对接接头平均拉伸强度为42MPa,搭接接头平均剪切强度为27MPa。

(2) 钎焊对接接头的拉伸断口表现为较明显的沿晶脆性断裂特性,断裂主要产生在沿 $\alpha$ -Mg晶界网状分布的粗大骨骼状 $\beta$ -Mg<sub>17</sub>(Al,Zn)<sub>12</sub>硬脆相处。

#### 参考文献

- [1] 陈振华,严红革,陈吉华,等. 镁合金[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004. 366- 370.
- [2] SHAPIRO A E. Brazing magnesium alloys and magnesium matrix composites[J]. Welding Journal, 2005, 84(10): 33- 43.
- [3] 张启运, 庄鸿寿. 钎焊手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999. 296- 299.
- [4] 美国焊接学会. 钎焊手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982. 209- 216.
- [5] Committee on Brazing and Soldering. Brazing Manual[M]. Miami: American Welding Society, 1975. 161- 168.
- [6] CAND I, ARNE S M. Entwicklung von magnesium-basis legierungen zum L ten von Leichtmetallen[D]. Aachen: Rheinisch-westfälische Technische Hochschule Aachen, 2005. 25- 26.
- [7] WATANABE T, KOMATU S, YANAGISAWA A, et al. Development of flux and filler metal for brazing magnesium alloy AZ31B[J]. Yosetsu Gakkai Ronbunshu Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 2004, 22(1): 163- 167.
- [8] WATANABE T, KOMATU S, OOHARA K. Development of flux and filler metal for brazing magnesium alloy AZ31B[J]. Welding Journal, 2005, 84(3): 37- 40.
- [9] 刘楚明, 朱秀荣, 周海涛. 镁合金相图集[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2006.
- [10] 李艳, 刘奎立, 陈芳雷. AZ31 镁合金铸态组织及其退火工艺研究[J]. 弹箭与制导学报, 2006, 26(4): 339- 341.
- [11] 屠怡范, 陈晶益, 张波萍, 等. AZ31 铸造镁合金的物相和显微组织[J]. 铸造, 2006, 55(5): 509- 512.
- [12] 金头男, 聂祚仁, 李斗星. 浸渍挤压(SiCw+B4Cp)/Mg(AZ91)复合材料的微观组织[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(1): 110- 114.
- [13] 郭强, 严红革, 陈振华, 等. 均匀化退火工艺对铸态AZ80镁合金组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2006, 31(7): 77- 80.
- [14] 崔忠圻. 金属学与热处理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1989. 189- 193.
- [15] 张菊梅, 蒋百灵, 王志虎, 等. 固溶和时效对AZ80镁合金断裂行为的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2007, 27(9): 663- 666.

基金项目: 北京市教委科技发展计划面上项目(KM200710005005)

收稿日期: 2008-06-02; 修订日期: 2008-07-16

作者简介: 马力(1971—), 男, 博士研究生, 现从事镁合金钎焊材料及钎焊工艺研究, 联系地址: 北京工业大学材料科学与工程学院(100124)。E-mail: mali2050@emails.bjtu.edu.cn

(上接第66页)

- [6] MOGILEVSKY P. Application of diffusion barriers in composite materials[J]. Materials Science and Engineering, 1998, A242: 235- 247.
- [7] SUBRRAMANIAN P R. Fabrication of SiC fibre reinforced titanium matrix composite by magnetron sputtering [J]. Materials Science and Engineering, 1998, A244, 1- 5.
- [8] 吕祥鸿, 杨延清. Ti基复合材料界面反应扩散的微观分析[J]. 材料工程, 2008, (6): 21- 24.
- [9] 陈波, 毛唯, 谢永慧, 等. Ti-Zr-Cu-Ni-Co系新钎料的成分设计

及TC4合金钎焊接头的力学性能[J]. 航空材料学报, 2006, 26(1): 59- 62.

基金项目: 航空基础科学基金资助项目(2006ZE21004)

收稿日期: 2008-06-02; 修订日期: 2008-07-20

作者简介: 陈波(1979—), 男, 工程师, 工学硕士, 主要从事新材料的钎焊扩散焊研究工作, 联系地址: 北京 81 信箱 20 分箱(100095)。E-mail: chenbo621@sina.com