

AZ31B 镁合金/不锈钢异种合金双光束 激光熔钎焊接特性

李俐群 郭 伟 檀财旺

(哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 以镁基焊丝为填充材料,采用双光束激光熔钎焊的方法对 AZ31B 镁合金/不锈钢的焊接特性进行了研究。分析了不同工艺参数对焊缝成形、接头力学性能和断裂行为的影响。结果表明,采用双光束进行填丝熔钎焊能够获得较满意的外观成形,无明显缺陷,焊接工艺范围较宽。接头拉伸均断裂于熔化焊的镁侧焊缝及热影响区(HAZ),最大剪切强度为 193 MPa,达到镁合金母材强度的 71%。组织分析发现焊缝和 HAZ 的晶粒粗大,成为接头的薄弱部位,是接头失效的主要原因。钎焊侧界面发生了冶金反应,界面处生成 $1\sim 2\ \mu\text{m}$ 的反应层。

关键词 激光技术;镁合金;不锈钢;熔钎焊

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0403002

Welding Characteristics of AZ31B Magnesium Alloy/Stainless Steel Dissimilar Alloys by Dual Beam Laser Welding-Brazing Process

Li Liqun Guo Wei Tan Caiwang

(School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract AZ31B magnesium alloys and 201 stainless steel are joined by laser welding-brazing process with Mg based filler. The welding characteristics including influence of processing parameters on weld appearance, mechanical properties and fracture behavior are studied. Results indicate that satisfactory appearance of welds without evident defects can be achieved by dual beam laser-brazing process with filler. A wide processing window is obtained. The tensile-shear test shows that fracture occurred at two places, weld seam and heat affect zone (HAZ) at the welding side of Mg alloys. The maximum shear strength can reach 193 MPa, which is 71% of that of Mg base metal. The microstructure observed indicates that seam and HAZ are weak parts, which results in failure of joint due to presence of coarse grains. Metallurgical reaction occurs at the brazing side, where reaction layer with thickness of $1\sim 2\ \mu\text{m}$ forms.

Key words laser technique; magnesium alloys; stainless steel; welding-brazing

OCIS codes 140.3390; 350.3390; 160.3900

1 引 言

镁合金具有密度低和比强度高优点,在汽车制造、航空航天、3C 电子等领域有着广泛的应用前景^[1~3],而不锈钢具有较好的耐腐蚀性能在汽车、建筑、化工、机械等领域应用广泛^[4,5]。如果能够实现镁合金和不锈钢的焊接,将发挥异种材料的不同优势,扩大镁合金的应用范围,更大程度上实现轻量化,节约能源。在资源匮乏的今天具有重大的研究价值和前景。

Mg、Fe 熔点上的巨大差异以及冶金上的不相容^[6]使镁合金和钢之间的焊接性较差。Elthalabawy 等^[7]采用液相焊的方法,添加 Cu 和 Ni 作为中间层,尽管通过界面冶金结合实现了两种难焊材料的焊接,但其操作复杂,效率较低,不适于实际应用,且界面三元合金相的大量形成降低了接头剪切强度(最大仅为 57 MPa)。Liu 等^[8]采用激光-钨极气体保护弧焊(GTA)复合来焊接 AZ31B 镁合金与 304 不锈钢,由于镁合金烧损严重造成焊缝成

收稿日期: 2011-10-31; 收到修改稿日期: 2011-12-23

作者简介: 李俐群(1970—),女,博士,副教授,主要从事激光加工技术基础与应用等方面的研究。

E-mail: liliquan@hit.edu.cn

形不佳。Miao 等^[9,10]采用激光自熔钎焊方法焊接 AZ31B 镁合金与 Q235 钢,尽管接头强度较以前有较大提高,但是对激光偏移量有着严格要求,焊接过程稳定性不佳,工艺范围较窄。激光熔钎焊具有能量密度易于控制、激光与工件作用时间短、焊接变形和残余应力均较小、激光作用位置精确可控等特点,是异种材料连接中较为合适的焊接方法^[11]。

本文以 CO₂ 激光为热源,采用分光镜将激光束分成双束用来预热不锈钢、促使熔融镁合金更好地流动,以求获得更大的铺展面积^[12~14]。同时以 AZ31 镁合金焊丝为填充钎料,扩大焊接工艺范围。从焊缝成形特点及对应的接头力学性能的影响、熔焊及钎焊界面组织分布规律等方面对双光束模式下镁合金/不锈钢激光熔钎焊特性进行研究。

表 2 201 不锈钢化学组成

Table 2 Chemical compositions of 201 stainless steel

Element	C	Si	Mn	S	P	N	Cr	Ni	Fe
Mass fraction /%	≤0.15	≤0.75	5.5~7.5	≤0.03	≤0.06	≤0.25	16~18	3.5~5.5	Bal.

表 3 AZ31 焊丝化学组成

Table 3 Chemical compositions of AZ31 welding wire

Element	Fe	Al	Zn	Mn	Si	Mg
Mass fraction /%	0.0018	3.27	1.26	0.24	0.0072	Bal.

2.2 实验方法

激光熔钎焊接过程如图 1 所示。接头采用搭接形式,由于镁的熔点(660 °C)较低,故将镁合金作为

2 实验材料及方法

2.1 实验材料

采用 AZ31B 镁合金与 201 不锈钢作为母材,其中镁合金为 H24 态,轧制后不完全退火,不锈钢为调制态。试验件规格为 100 mm × 30 mm × 1.5 mm,其化学成分如表 1 和表 2 所示。填充焊丝直径为 2 mm,与镁合金母材主要成分及含量基本相同,化学组成见表 3。

表 1 AZ31B 镁合金化学组成

Table 1 Chemical compositions of AZ31B magnesium alloys

Element	Al	Zn	Si	Fe	Mg
Mass fraction /%	2.5~3.5	0.5~1.5	0.10	0.005	Bal.

上板(焊接过程中熔化),不锈钢作为下板。两束光的空间排布采用并行模式,焊接时激光垂直照射表面,采用前送丝方式,保护气进行侧吹保护。

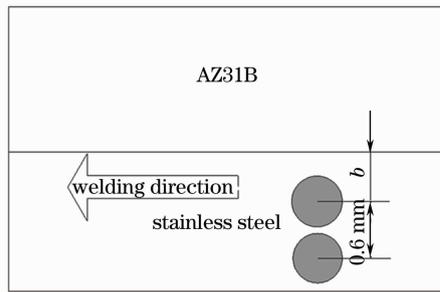
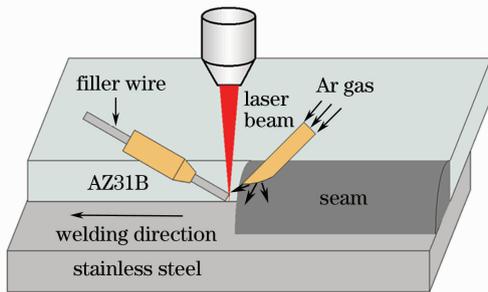


图 1 双光束激光熔钎焊过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the laser welding-brazing process in the dual beam mode

焊后采用金相显微镜(OM)和扫描电镜(SEM)、能谱分析(EDS)等手段对接头的宏观成形、组织形貌和成分进行观察和分析。在 INSTRON-5569 电子万能材料试验机上进行拉剪实验,拉伸速率为 0.5 mm/min,数据点采集频率为每秒 10 点,实验温度 18 °C,可获得剪切力 F 。通过测量搭接焊缝宽度来反映在不同工艺参数下钎料在钢板上的润湿铺展程度。

3 焊接参数对接头成形和性能的影响

主要焊接参数为激光功率 P ,焊接速度 V_h ,送丝速度 V_s ,焊接线能量 E 。实验中激光偏离量 b (激光作用点到搭接位置距离)统一选择为偏移钢侧 1 mm。主要探究的焊接参数为焊接线能量和焊接速度,选择依据如下:1) 镁合金熔点低,焊接存在烧损严重的问题^[15~17],焊接线能量的选择非常重要。所以在填充金属量相同的前提下,设置合理的参数,

以焊缝成形情况和力学性能为指标,获取合适的焊接线能量范围。2) 焊接速度这一参数决定熔池存在时间,对焊缝成形影响巨大,其大小亦体现出焊接效率的高低。在优化焊接线能量范围内,改变该参数,测量熔化镁合金的焊缝宽度,可以体现其在不同参数下的润湿铺展能力。

3.1 焊接线能量

研究焊接线能量对焊缝成形及焊后力学性能(主要指剪切力 F)的影响。由于过低的线能量不利于焊丝熔化及其在不锈钢上的铺展,容易出现焊丝未熔化即插入熔池的情况,影响过程稳定性;过高的线能量又会造成镁合金的大量烧损,同样影响焊缝成形。为此,在焊缝外观较好的情况下,设置了从 3.0~6.0 kJ 的焊接线能量变化范围。具体的焊接

参数如表 4 所示。

表 4 实验采用的焊接参数

Table 4 Welding parameters adopted in the experiment

Number	P/W	$V_h/(m/min)$	$V_s/(m/min)$	$E/(kJ/cm)$
1	1200	0.24	0.84	3.0
2	1300	0.22	0.80	3.5
3	1350	0.16	0.56	4.5
4	1200	0.14	0.51	5.2
5	1200	0.12	0.42	6.0

图 2 为 1~5 号试件焊接接头截面形貌和焊缝宽度的变化曲线。由图可见,接头截面无明显缺陷,具有熔钎焊的明显特征。曲线变化表明,随着焊接线能量的增加,焊缝宽度先增加,线能量达到 4.5 kJ/cm 后,随线能量增加,焊缝宽度显著降低。

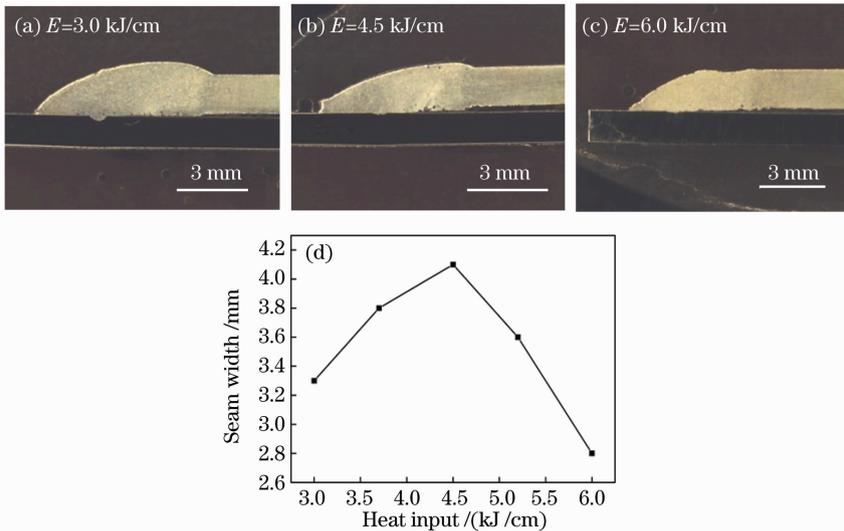


图 2 焊接线能量对焊缝宽度的影响

Fig. 2 Influence of weld heat input on weld seam length

分析认为,当焊接线能量增加(4.5 kJ/cm 之前)时,随着焊接线能量的增高,钎料和不锈钢板温度均增大,表面张力降低^[18],高温下钎料的粘度降低,流动能力增强,且熔池的存在时间增加,因而焊缝宽度增加。送丝量一定意味着焊道上的熔覆金属量基本保持不变。随着焊接线能量的进一步增加,熔池的温度显著升高,同时熔池存在的时间延长,而镁合金沸点(1090 °C)较低,大量的 Mg 将发生气化,烧损蒸发严重,这势必会降低最终的焊缝宽度,影响焊缝成形。

随后,对不同焊接线能量的接头进行剪切测试,试件均断裂于镁合金一侧的熔焊焊缝。同时发现剪切力与焊接线能量之间的关系如图 3 所示。随着焊接线能量的增加,剪切力先增加后降低。这种变化趋势与图 2 中体现的规律相同。容易推断,较大的

焊缝宽度会造成界面结合面积更大,当焊缝强度相当的情况下,更大的焊缝宽度意味着在承载时受力面积更大,使接头发生塑性变形和最终断裂需要的剪切力更大。

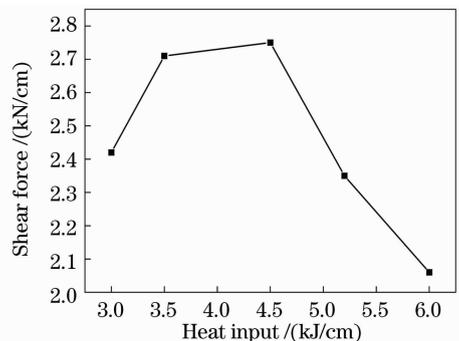


图 3 焊接线能量与剪切力的关系

Fig. 3 Relation between heat input and shear force

组织决定性能,焊缝强度是否相当,取决于焊缝处的显微组织,图4为不同线能量下的熔焊焊缝组织。可见,焊缝的晶粒大小以及析出相的大小、分布基本相同,焊缝中析出的第二相质点都较多,熔池冷却过程中的非自发形核提供了大量质点,阻碍了晶

粒进一步长大,这也可以解释不同线能量组织差异较小的问题。这些现象也证明了在所选择的焊接参数下,焊接线能量对组织没有明显的决定关系。综上所述,影响剪切力的主要原因是焊接成形上的差异。

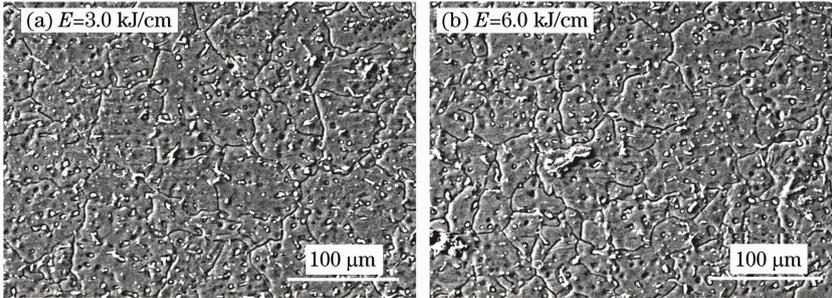


图4 焊缝组织对比

Fig. 4 Contrast of the seam microstructure

3.2 焊接速度

实验中设置焊接速度为0.16~0.30 m/min,最大速度为最小的2倍左右,在此参数下基本可以获得较好的焊缝成形。具体焊接参数如表5所示。

焊接速度对焊缝成形的影响如图5所示。通过比较试件的焊缝成形可以看出,速度较低(例如0.20 m/min)时,焊缝宽度较大,截面无任何缺陷产生,而焊接速度显著提高(例如0.30 m/min)时,焊缝宽度下降,同时焊缝内部出现较大气孔。

表5 实验采用的焊接参数

Table 5 Welding parameters adopted in the experiment

Number	P/W	$V_h/(m/min)$	$V_s/(m/min)$	$E/(kJ/cm)$
1	1800	0.30	1.05	3.6
2	1500	0.25	0.90	3.6
3	1350	0.22	0.77	3.6
4	1200	0.20	0.70	3.6
5	960	0.16	0.56	3.6

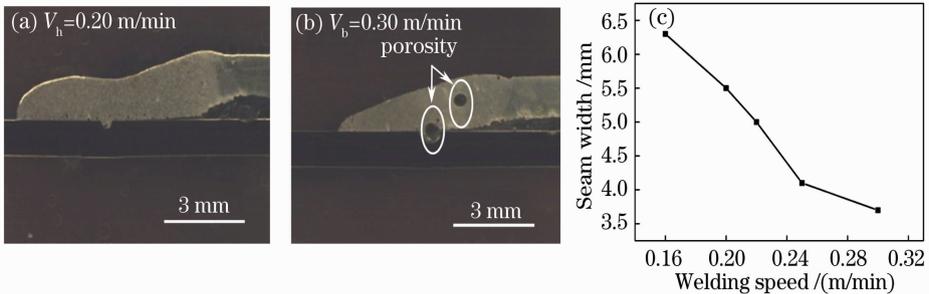


图5 焊接速度与焊缝宽度的关系

Fig. 5 Relation between welding speed and seam width

气孔的产生主要与钎料的凝固速度和气泡的逸出速度相关。相同的焊接线能量下,焊接速度较低时,熔融镁合金钎料与不锈钢的接触时间增加,钎料温度高,粘度低,流动性增强,既可以使焊缝宽度增加又有利于气孔上浮逸出。此外,焊接速度低时,熔池存在时间长,钎料完全凝固之前,气泡有充分的时间可以逸出,最终获得无气孔的接头。焊接速度增加后,焊接过程的稳定性变差,容易卷入空气,而熔池存在时间的变短,使气体来不及上浮逸出,最终残留在钎料内部。而较大气孔会增加应力集中程度,

必然会降低材料的力学性能。

对上述试件进行拉剪实验,发现最大剪切力可以达到2.90 kN/cm,相应的剪切强度为193 MPa,达到镁合金母材强度的71%。焊接速度与剪切力之间的关系如图6所示。焊接速度高于0.2 m/min时试件断裂于镁合金一侧焊缝,且随着焊接速度的增加(焊缝宽度降低),剪切力降低。焊接速度小于等于0.2 m/min时,焊缝宽度高于5.5 mm,试件断裂于镁合金一侧的热影响区(HAZ)且剪切力数值变化不大。这是因为HAZ承载面积为镁合金试件

的厚度与宽度的乘积,是一个定值。因此剪切力大小是由焊缝成形决定的。

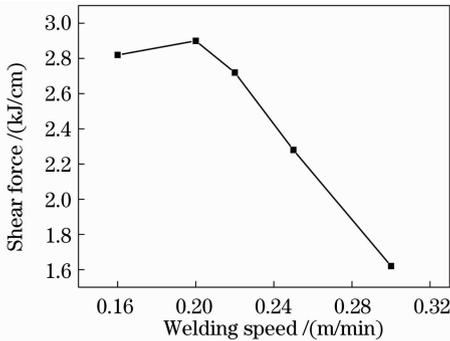


图6 焊接速度与剪切力的关系

Fig. 6 Relation between welding speed and shear force

通过焊缝外观成形以及截面形貌、力学性能的比较,发现在 P 为 960~1500 W, V_h 为 0.16~0.25 m/min, V_s 为 0.56~0.90 m/min 时,均能够获得较好的焊缝成形,基本无气孔缺陷。发生熔焊的镁侧焊缝存在一定程度的下塌。在激光的直接照射下,钢表面发生微熔。总体来说,焊接工艺范围较宽,焊接稳定性较好。

4 组织及断口分析

4.1 熔焊组织

焊接时镁合金一侧的部分母材熔化和钎料混合后形成熔焊接头。图7为典型熔焊接头各部分的组织形貌。熔焊一侧的组织主要有 HAZ、焊缝柱状晶区、焊缝等轴晶区,没有明显的熔合区。熔化钎料凝固结晶时在熔合线附近固液界面处形核,同时由于镁合金导热速度快、温度梯度大的缘故,导致晶粒生长成柱状晶。但柱状晶区域较窄,宽度仅为几个晶粒。这主要由于焊缝中等轴晶的迅速长大抑制了柱状晶的形成。同时在快速冷却条件下,第二相由于熔点较高,在熔池冷却过程中率先析出,成为非均匀形核的质点,大量的形核质点为等轴晶的形成创造了有利条件。与镁合金母材相比,HAZ 被高温加热后晶粒粗大且各部分不均匀,晶粒的不均匀性会造成塑韧性的不均一性,在承载过程中易产生变形的不一致性,更容易产生微裂纹从而恶化接头的力学性能。同时根据 Hall-Petch 公式^[19],焊缝和 HAZ 的晶粒粗大会造成材料屈服强度的降低。因而可以猜测在承载过程中,焊缝与 HAZ 容易成为薄弱位置。

为了探究熔焊侧接头组织不均一性对力学性能的影响,进行了显微硬度测试,分别测试焊缝、HAZ

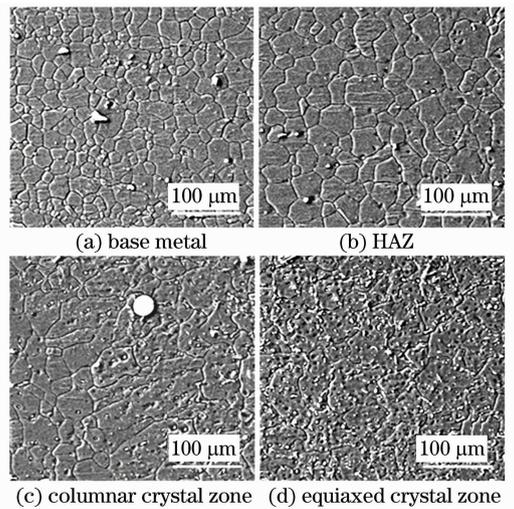


图7 镁合金一侧的焊接接头组织

Fig. 7 Microstructure of the welding joint at the magnesium side

及母材 3 个区域的硬度。每个区域取 3 个点求取平均值作为该区域的硬度。测试结果如图 8 所示。焊缝和母材晶粒的显微硬度基本相同,HAZ 硬度明显较低,这是由于 HAZ 的晶粒较粗大造成组织出现了一定程度的软化现象。而焊缝处尽管晶粒同样比较粗大,但熔池凝固过程中弥散的第二相质点的析出阻碍了承载过程中的塑性变形,起到了质点强化的作用,从而补偿了晶粒粗大造成的硬度损失。同时发现焊接线能量与硬度之间没有明显的相关性。

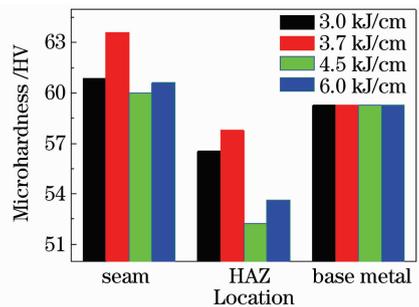


图8 不同线能量条件下焊接接头熔焊焊缝、HAZ 的显微硬度

Fig. 8 Microhardness of weld seams and HAZ when welding line energy changes

4.2 断口

图9为断裂在焊缝处的断口形貌,由图9(a)中较多的韧窝可以判断断裂形式为韧性断裂。焊缝断裂处有较多的韧窝和第二相质点,证明材料在断裂之前发生了较大的塑性变形,这是由于激光焊接有快冷快热的特点,所以熔池存在时间大大缩短,晶粒长大受限从而保留了材料较高的韧性。对图9(b)中韧窝处的质点进行 EDS 分析,结果如表 6 所示。

根据合金相图以及原子比例,可以推测生成了产物 $Al_{11}Mn_4$ 。该产物的熔点可达 $989\text{ }^{\circ}\text{C}$,远高于 Mg 的熔点 $650\text{ }^{\circ}\text{C}$,在熔池冷却过程中率先析出,容易成为焊缝晶粒的形核质点。

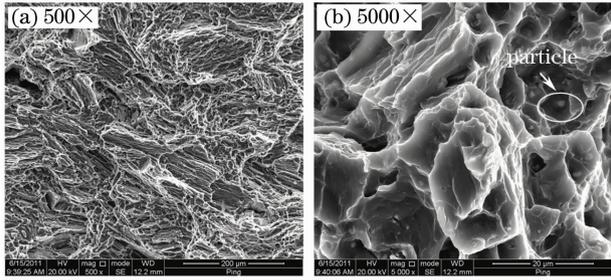


图 9 断裂在焊缝的断口形貌

Fig. 9 Fracture appearance of the weld seam

表 6 EDS 分析结果

Table 6 EDS analysis result

Element	Mass fraction /%	Atom fraction /%
MgK	54.32	62.25
AlK	27.77	28.67
MnK	17.91	9.08
Matrix	Correction	ZAF

4.3 钎焊组织

关于熔融的镁在钢上铺展,异种金属之间究竟是冶金结合还是机械结合,一直没有定论。Liu 等^[8]没有发现明显的界面反应层,而且认为熔深决定了力学性能。Miao 等^[10]发现了镁钢的界面处生成了低于 $4\text{ }\mu\text{m}$ 的扩散过渡层。本文对该问题进行进一步分析。

实验中采用在高倍($20000\times$)SEM 对界面进行分析,如图 10 所示,发现异种金属的界面生成一层很薄的反应层,在图 10(a),(b)中该层厚度分别大约为 $1.6\text{ }\mu\text{m}$ 和 $1.3\text{ }\mu\text{m}$ 。反应层分布较均匀,可见镁和钢之间发生了冶金结合。薄而均匀的界面层使异种材料的界面在承载过程中不再是薄弱位置。

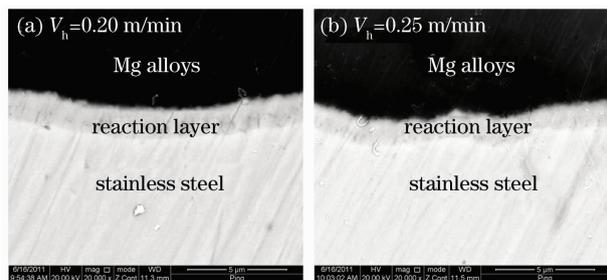


图 10 界面反应层

Fig. 10 Interface reaction layer

在应力集中较大、缺口效应明显的搭接接头出现较高的剪切强度,除了与焊接条件下接头没有气

孔、裂纹缺陷以及激光热源焊接条件下接头晶粒较细小有关外,也体现了界面处发生冶金结合的优越性。

通过图 10(a),(b) 的比较发现,当焊接速度较大时,即熔池存在时间较短时,反应层厚度相应降低。反应层的厚度显然与元素扩散有关,较常用的界面反应层计算公式^[20]为

$$X = k_0 t^n \exp[-Q/(RT)], \quad (1)$$

式中 X 表示界面反应层厚度; k_0 表示常数; t 表示扩散时间; n 表示时间因子,通常取 0.5 ; Q 表示扩散激活能; R 表示气体常数; T 表示反应温度。由(1)式可见,时间和温度是决定反应层厚度的重要因素,反应时间越长,扩散程度越剧烈,反应层厚度越大。

反应层的存在证明了界面发生了冶金结合,产生了有别于母材的新相,该相的成分、化学式需要进一步实验鉴定。

5 结 论

采用双光束激光填丝熔钎焊方法焊接镁合金/不锈钢能够获得较好的焊缝成形,焊接工艺范围较宽,焊接过程的稳定性较高,几乎无气孔缺陷。焊缝宽度随线能量的增加呈现先增加后降低的趋势。随着焊接速度的提高,焊缝长度明显降低。熔钎焊接头具有优异的力学性能,剪切力可以达到 2.90 kN/cm ,接头强度最大可达镁母材的 71% 。当焊缝宽度较大(大于等于 5.5 mm)时断裂发生在 HAZ,其余断裂在焊缝,断裂形式主要为韧性断裂。与镁合金母材相比,经历熔焊过程的镁侧焊缝与 HAZ 晶粒粗大。HAZ 存在软化现象。发生钎焊过程的镁钢界面处形成极薄的反应层,厚度仅为 $1\sim 2\text{ }\mu\text{m}$,界面实现了冶金结合。

参 考 文 献

- 1 B. L. Mordike, T. Ebert. Magnesium: properties-applications-potential[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2001, **302**(1): 37~45
- 2 G. S. Cole. Issues that influence magnesium's use in the automotive industry [J]. *Materials Science Forum*, 2003, **419-422**: 43~50
- 3 Zhang Tongjun, Li Xingguo. Applications of magnesium alloys and progress of metallic magnesium industry in China [J]. *Materials Review*, 2002, **16**(7): 11~13
- 4 张同俊, 李星国. 镁合金的应用和中国镁工业[J]. *材料导报*, 2002, **16**(7): 11~13
- 5 N. R. Baddoo. Stainless steel in construction: a review of research, applications, challenges and opportunities[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2008, **66**(11): 1199~1206
- 6 K. H. Lo, C. H. Shek, J. K. L. Lai. Recent developments in stainless steels[J]. *Materials Science and Engineering R*, 2009,

- 65(4-6): 39~104
- 6 X. Qi, G. Song. Interfacial structure of the joints between magnesium alloy and mild steel with nickel as interlayer by hybrid laser-TIG welding [J]. *Materials & Design*, 2010, **31**(1): 605~609
 - 7 W. Elthalabawy, T. Khan. Liquid phase bonding of 316 L stainless steel to AZ31 magnesium alloy [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2011, **27**(1): 22~28
 - 8 L. M. Liu, X. Zhao. Study on the weld joint of Mg alloy and steel by laser-GTA hybrid welding [J]. *Materials Characterization*, 2008, **59**(9): 1279~1284
 - 9 Y. G. Miao, D. F. Han, J. Z. Yao *et al.*. Microstructure and interface characteristics of laser penetration brazed magnesium alloy and steel [J]. *Science and Technology of Welding & Joining*, 2010, **15**(2): 97~103
 - 10 Y. G. Miao, D. F. Han, J. Z. Yao *et al.*. Effect of laser offsets on joint performance of laser penetration brazing for magnesium alloy and steel [J]. *Materials & Design*, 2010, **31**(6): 3121~3126
 - 11 Chen Shuhai, Li Liqun, Chen Yanbin. Interface characteristic and property of Ti/Al dissimilar alloys joint with laser welding-brazing[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2008, **18**(6): 991~996
陈树海, 李俐群, 陈彦宾. 铝/钛异种合金激光熔钎焊接接头界面特性[J]. *中国有色金属学报*, 2008, **18**(6): 991~996
 - 12 H. Laukant, C. Wallmann, M. Müller *et al.*. Fluxless laser beam joining of aluminium with zinc coated steel[J]. *Science and Technology of Welding & Joining*, 2005, **10**(2): 219~226
 - 13 H. Laukant, C. Wallmann, M. Korte *et al.*. Flux-less joining technique of aluminium with zinc-coated steel sheets by a dual-spot-laser beam [J]. *Advanced Materials Research*, 2005, **6-8**: 163~170
 - 14 Li Liqun, Chen Yanbin, Tao Wang. Research on dual-beam welding characteristics of aluminum alloy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1783~1788
李俐群, 陈彦宾, 陶汪. 铝合金双光束焊接特性研究[J]. *中国激光*, 2008, **35**(11): 1783~1788
 - 15 Feng Jicai, Wang Yarong, Zhang Zhongdian. Status and expectation of research on welding of magnesium alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2005, **15**(2): 165~178
冯吉才, 王亚荣, 张忠典. 镁合金焊接技术的研究现状及应用[J]. *中国有色金属学报*, 2005, **15**(2): 165~178
 - 16 G. Song, L. M. Liu, P. C. Wang. Overlap welding of magnesium AZ31B sheets using laser-arc hybrid process [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2006, **429**(1-2): 312~319
 - 17 Tan Caiwang, Li Liqun, Chen Yanbin *et al.*. Characteristics of fiber laser and CO₂ laser welding of AZ31B magnesium alloys[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(6): 0603015
檀财旺, 李俐群, 陈彦宾等. AZ31B 镁合金的光纤激光与 CO₂ 激光焊接特性[J]. *中国激光*, 2011, **38**(6): 0603015
 - 18 F. Aqra, A. Ayyad. Theoretical temperature-dependence surface tension of pure liquid gold[J]. *Mater. Lett.*, 2011, **65**(14): 2124~2126
 - 19 N. Hansen. Hall-Petch relation and boundary strengthening[J]. *Scripta Materialia*, 2004, **51**(8): 801~806
 - 20 W. Song, K. Saida, A. Ando *et al.*. Brazability of aluminum alloy to steels using aluminum filler metal-dissimilar laser brazing of aluminum alloy and steels (Report I)[J]. *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, 2004, **22**(2): 315~322

栏目编辑: 宋梅梅