

DOI : 10.3901/JME.2016.24.052

镍铝青铜焊丝进行镁/镀锌钢板点焊的焊接性分析*

曹睿 朱海霞 许庆伟 张海燕 林巧力 陈剑虹

(兰州理工大学有色金属先进加工与再利用省部共建国家重点实验室 兰州 730050)

摘要:以镍铝青铜焊丝为填充材料,对 AZ31B 镁合金/镀锌钢板进行冷金属过渡点塞焊试验研究,分析镁板上孔直径对镁钢点塞焊接头力学性能的影响,并通过分析焊接接头微观组织及其元素分布状况来研究其连接机理。研究表明:使用镍铝青铜焊丝能够得到焊缝美观的镁/镀锌钢异种金属的连接接头。镁/钢板焊接接头的焊缝主要由 α -Cu 和 CuAl_2 组成,熔合区由镁的固溶体 α -Mg 以及 $\text{Al}_2\text{Cu}_3\text{Mg}_2$ 和 Mg_2Cu 混合的金属间化合物组成。镁板上孔的直径对镁钢接头性能有很大的影响。随着镁板孔径的增大,镁钢点塞焊接头的最大抗拉载荷先增大后减小,且当镁板孔径为 5 mm 时接头的最大抗拉载荷达到最大为 3.4 kN。焊缝金属和镁母材的连接处即熔合区存在大量脆性金属间化合物,使得镁/钢接头整体力学性能较差。

关键词:镁合金 AZ31; 镀锌钢; 冷金属过渡; 连接机理; 抗拉载荷

中图分类号: TG457

Weldability Analysis of Mg/galvanized Steel Spot Plug Welded Joints with Ni-Al-Cu Cu-based Wire

CAO Rui ZHU Haixia XU Qingwei ZHANG Haiyan LIN Qiaoli CHEN Jianhong

(State Key Laboratory of Advanced Processing and Reuse of Nonferrous Metals,

Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050)

Abstract : AZ31B magnesium alloys and galvanized steel sheets are joined by cold metal transfer spot plug welding process with CuAl8Ni6 Cu-based wire based filler wire. The effects of processing parameters and the diameter of the hole in the Mg sheet on mechanical properties are studied. The joining mechanism is achieved by analyzing the microstructure and distribution of elements of welded joints. The results indicate that good weld appearance can be formed for CMT spot plug welded Mg AZ31-galvanized steel joint with CuAl8Ni6 Cu-based wire. The weld metal is composed of α -Cu + CuAl_2 eutectic phases, the fusion zone is composed of amounts of brittle intermetallics $\text{Al}_2\text{Cu}_3\text{Mg}_2+\text{Mg}_2\text{Cu}$ phases. The hole diameter in Mg sheet has a major effect on the tensile properties of the Mg-steel joints. With the increase of the hole diameter in Mg sheet, the tensile load firstly increase, then decrease. When the diameter of the hole in Mg sheet reaches 5mm, the maximum tensile load of 3.4kN can be reached. Amounts of brittle intermetallics make the tensile load of Mg-steel spot plug joints become lower.

Key words : AZ31 magnesium alloy ; galvanized steel ; cold metal transfer ; joining mechanism ; tensile load

0 前言

近年来考虑到车辆减重、节约能源以及满足不同的服役环境等方面的要求,异种金属连接镁-铝、铝钛、铝-钢、镁-钢的连接需求较为广泛^[1-3]。特别在汽车领域镁-钢、铝-钢的连接显得至关重要。由于 Mg-Fe 之间既没有固溶度也没有金属间化合物,因此直接连接其焊接性较差。同时由于其熔沸点相差较大,因此目前的大量研究主要集中于镁钢的熔钎焊研究。镁/钢连接最主要的难点是镁与铁之间不相互作用故可通过添加过渡元素,即找到一种金属或合金,

使其一方面与镁合金相互作用或反应,另一方面与钢相互作用或反应,从而实现对镁/钢连接作用。

大量研究学者已经通过各种焊接方法例如激光焊接、电弧焊、搅拌摩擦焊以及电阻焊等方法连接这两种金属^[4-14],结果发现要实现这两种金属的连接,焊丝中的其他元素 Al、Ni 以及钢板表面的镀层或者其他的夹层都是非常关键的。LIU 等^[8]通过电阻点焊的方法连接镁和钢,结果发现接头能成功连接的原因主要是镀锌钢表面的 Fe_2Al_5 ,这一观点得到大多数研究工作的支撑。SCHNEIDER 等^[10-12]的研究都发现镀锌层对镁钢连接起着关键的作用,锌涂层促进了镁和钢的润湿。

一些研究也通过采用 Ni 或者 Cu 夹层来实现镁钢的连接。REN 等^[13]采用 Cu 夹层电弧点焊的方法

* 国家自然科学基金(51675255)和 973 计划前期研究专项(2014CB660810)资助项目。20160629 收到初稿,20160831 收到修改稿

实现镁钢的连接，并且认为镁钢的熔钎接头由 $Al_3Cu_4Fe_3$ 和 Fe_4Cu_3 金属间化合物的复合过渡层组成。PATEL 等^[14]也通过 Sn 夹层来实现镁-裸钢的连接，发现采用 Sn 夹层后的强度远高于镁-裸钢板，镁-镀锌钢板接头的性能。这些性能的提高主要是由于 Sn 和 Mg 以及 Fe 形成固溶体，同时在界面上也形成类似于 Sn 的复合物和 Mg_2Sn 共晶相。

前期学者大量的研究主要集中于搭接焊等形式，而在实际应用中点塞焊具有受力状况较好、应力集中小、节约材料等特点，在工程机械中应用广泛。本研究探讨采用冷金属过渡点塞焊的方法，使用镍铝青铜(CuAl8Ni6)焊丝连接镁钢的可焊性。

1 试验方法

本试验使用 Fronius 公司生产的 TPS3200 系列数字化 CMT 焊机焊接 1 mm 厚的镀锌钢板和 3 mm 厚的 AZ31B 镁合金板。采用直径为 1.2 mm，化学成分如表 1 所示的镍铝青铜焊丝，所采用的焊丝正对 50 mm×50 mm 搭接区域的中心点，保护气为氩气，气流量为 15 L/min，焊接装置示意图如图 1 所示。通过改变送丝速度即热输入和填充金属量来研究镁/钢点塞焊接头的宏观形貌、微观组织、力学性能。

表 1 镍铝青铜焊丝的化学成分(质量分数) %

Ni	Al	Fe	Mn	Zn	Pb	Si	Cu
4.32	8.79	3.16	1.05	0.003	0.003	0.038	余量

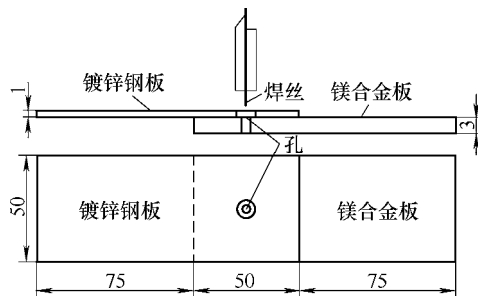


图 1 焊接装置示意图

前期研究发现采用镍铝青铜焊丝点焊镁/镀锌钢板时，送丝速度 8.3 m/min，点焊时间 1.5 s 时最优。在镁合金板上打孔使得焊接后的焊点可以呈铆钉的形式镶嵌在镀锌钢板和镁合金板之间，这对接头性能也有很大的影响，因此在这一研究中，镁合金板上也同样进行打孔，以获得更好的力学性能，与此同时也研究了镁板孔径对其力学性能的影响，焊接工艺参数如表 2 所示。其中镀锌钢板的工艺孔直径均为 6 mm。

表 2 镍铝青铜焊丝点焊镁/镀锌钢板工艺参数

序号	送丝速度/(m/min)	点焊时间/s	镁板孔径/mm	电压/V	电流/A
Cu00	8.3	1.5	0	13.7	164
Cu01	8.3	1.5	1	13.8	162
Cu03	8.3	1.5	3	13.9	165
Cu04	8.3	1.5	4	13.7	165
Cu05	8.3	1.5	5	13.1	164
Cu06	8.3	1.5	6	13.0	164

2 焊接接头的宏观形貌

使用镍铝青铜焊丝点焊镁/镀锌钢板时，焊接过程中，电流电压都较小、热输入不大、焊接飞溅很小。图 2 为 Cu05 试样的焊点形貌。可以看出焊缝金属在镀锌钢板上的铺展润湿性比较好，焊缝成形良好，较为美观。

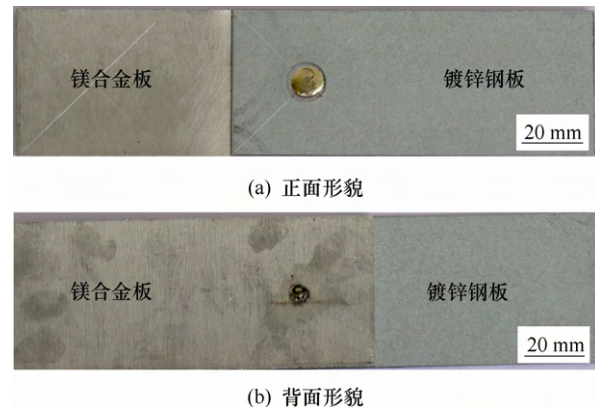


图 2 镍铝青铜焊丝点焊镁/镀锌钢的焊点形貌

3 焊接接头的微观组织

图 3 为 Cu00 号试样点焊接头横截面的宏观形貌，镍铝青铜焊丝形成的焊缝金属能在镀锌钢板表面很好的润湿铺展，使得焊缝和镀锌钢板之间结合紧密。但在熔合区处焊缝金属和镁母材之间生成有一层白色层。由此可知，镍铝青铜焊丝点焊镁/镀锌钢板的焊接接头的力学性能主要取决于焊缝金属和镁母材的连接处即熔合区。

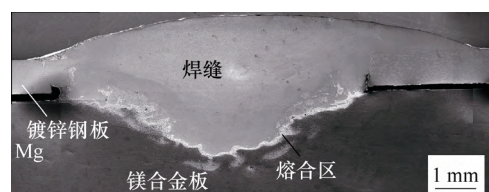
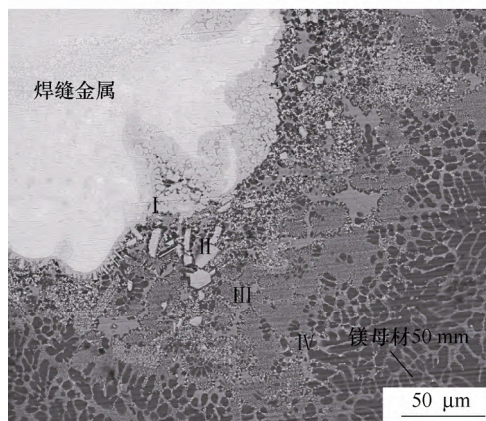


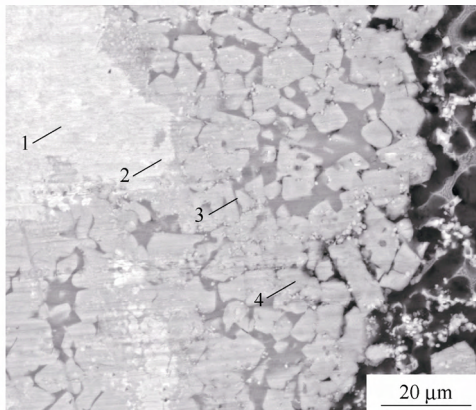
图 3 镍铝青铜焊丝点焊镁/镀锌钢板接头横截面的宏观形貌

图 4a 为镍铝青铜焊丝点焊后熔合区微观组织

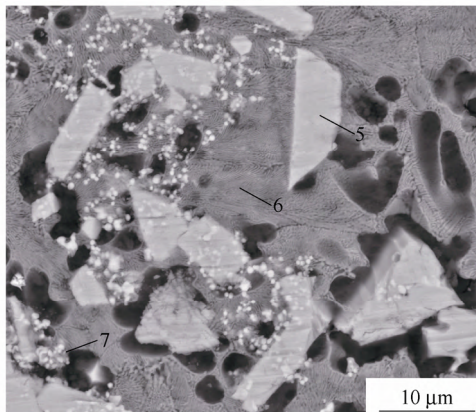
形貌,可以看到熔合区分为 I、II、III、IV 四种不同的区域。对各区域不同形貌的金属化合物,使用能谱分析其成分如表 3 所示。图 4b 是图 4a 中 I 处的微观组织形貌,可以看出 I 处主要是焊缝金属析出的块状金属间化合物,根据表 3 中成分可知,1 点所示的白色区域的焊缝金属由 α -Cu 和 CuAl_2 组成,2 和 4 点处白色的块状相参考图 5 的 Cu-Mg-Al 三元相图可知是 $\text{Al}_2\text{Cu}_3\text{Mg}_2$ 和 Mg_2Cu 混合的金属间化合物,而 3 点处的灰色相是 Mg_2Cu ; 图 4c 是图 4a 中 II 处的微观组织形貌,可以看出熔合区 II 处主要是灰色的共晶相和白色的块状相组成,根据能谱分析可知,其中 5 点处的白色块状相和点 2、点 4



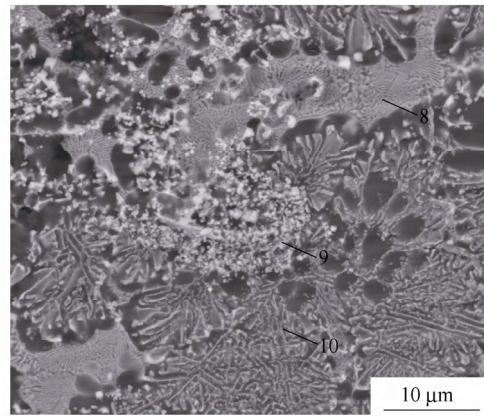
(a) 熔合区微观组织形貌



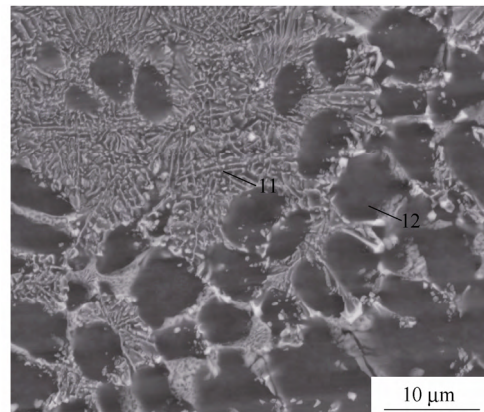
(b) I 处放大图



(c) II 处放大图



(d) III 处放大图



(e) IV 处放大图

图 4 镍铝青铜焊丝点焊镁/镀锌钢板接头熔合区微观组织形貌

处的块状相相同,都是 $\text{Al}_2\text{Cu}_3\text{Mg}_2$ 和 Mg_2Cu 混合的金属间化合物,点 6 处灰色的共晶组织则是 α -Mg 和 Mg_2Cu 的共晶相,点 7 处白色的絮状物则是 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 和 $\text{Al}_2\text{Cu}_3\text{Mg}_2$ 混合的金属间化合物;图 4d 是图 4a 中 III 处的微观组织形貌,可以看出 III 处主要是两种不同的共晶相组织,经分析发现,点 8 处为组织较致密的共晶相 A,它是 α -Mg 和 Mg_2Cu 的共晶相,和点 6 处的共晶相成分相同,点 10 处为组织较稀疏的共晶相 B,它是 α -Mg 和 $\text{Al}_2\text{Cu}_3\text{Mg}_2$ 的共晶相,点 9 处的白色絮状物与点 7 相同;图 4e 是图 4a 中 IV 处的微观组织形貌,IV 处主要是由共晶相组成的,根据成分以及形貌可知,点 11 处的共晶相和点 10 处的共晶相 B 都是 α -Mg 和 $\text{Al}_2\text{Cu}_3\text{Mg}_2$ 的共晶相,黑色相点 12 处经分析是母材镁合金。

4 焊接接头的力学性能

对镍铝青铜焊丝点焊镁/镀锌钢板的焊接接头进行拉伸试验,发现断裂均发生在焊缝金属和镁母材之间即熔合区处,如图 6 所示。

表3 图4中各点的成分分析

区域位置	元素原子分数(%)							可能的相
	Cu	Mg	Al	Ni	Mn	Zn	Fe	
1	64.4	5.7	22.2	3.8	1.7	0	2.2	α -Cu+CuAl ₂ (焊缝金属)
2	41.9	27.7	19.3	4.7	1.5	0	4.9	Al ₂ Cu ₃ Mg ₂ +Mg ₂ Cu
3	35.3	62.5	1.4	0.5	0.1	0.1	0.1	Mg ₂ Cu
4	40.4	38.1	18.8	1.7	0.9	0	0	Al ₂ Cu ₃ Mg ₂ +Mg ₂ Cu
5	40.5	37.9	19.1	1.3	0.8	0.3	0	Al ₂ Cu ₃ Mg ₂ +Mg ₂ Cu
6	16.3	82.1	0.9	0.1	0	0.6	0	α -Mg+Mg ₂ Cu共晶相
7	12.9	46.8	22.8	8.5	1.2	0	7.8	Mg ₁₇ Al ₁₂ +Al ₂ Cu ₃ Mg ₂
8	17.4	81.6	0.2	0	0.1	0.6	0.1	α -Mg+Mg ₂ Cu ₁ 共晶相
9	11.4	56.6	17.8	6.4	2.0	0	5.8	Mg ₁₇ Al ₁₂ +Al ₂ Cu ₃ Mg ₂
10	10.7	84.1	4.9	0.1	0.1	0.1	0	(α -Mg+Al ₂ Cu ₃ Mg ₂)共晶相
11	11.9	79.5	8.2	0	0	0.4	0	(α -Mg+Al ₂ Cu ₃ Mg ₂)共晶相
12	1.6	97.9	0.6	0	0	0.1	0	α -Mg(镁母材)

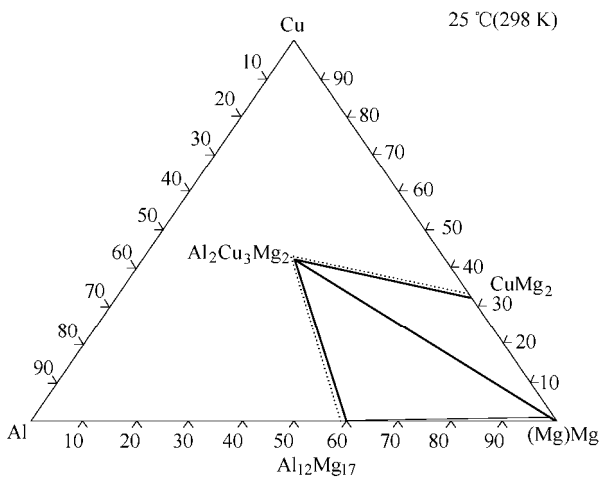


图5 Cu-Mg-Al三元相图

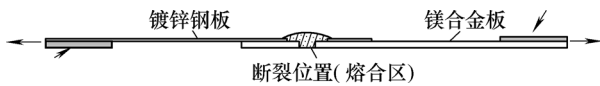
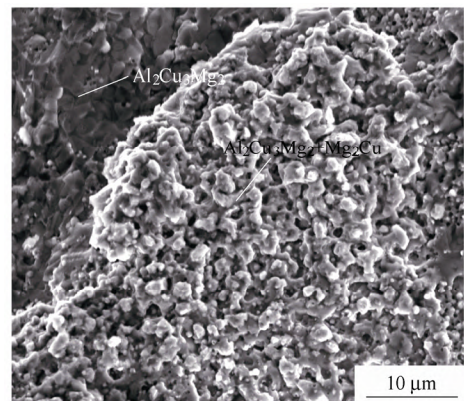
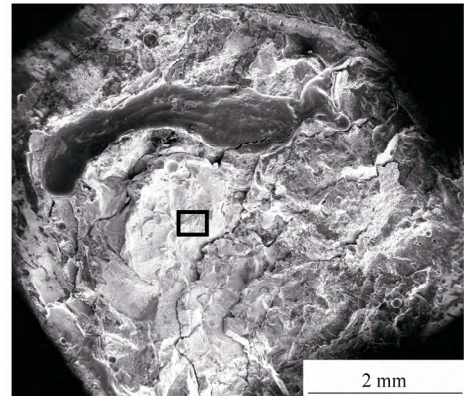


图6 镍铝青铜焊丝点焊镁/镀锌钢板接头的断裂示意图

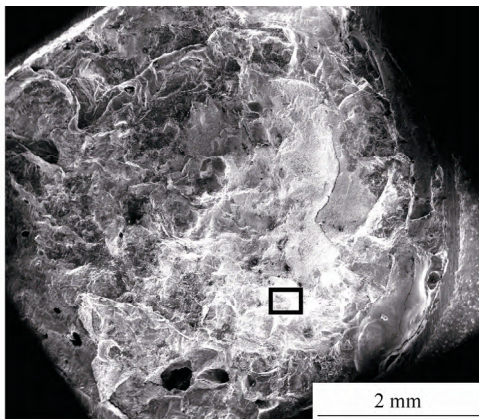
图7为镍铝青铜焊丝点焊镁/镀锌钢板焊接接头熔合区断裂断口的形貌,图7a、7c分别为焊缝和镁母材侧的形貌,图7b、7d为图7a、7c的放大图。



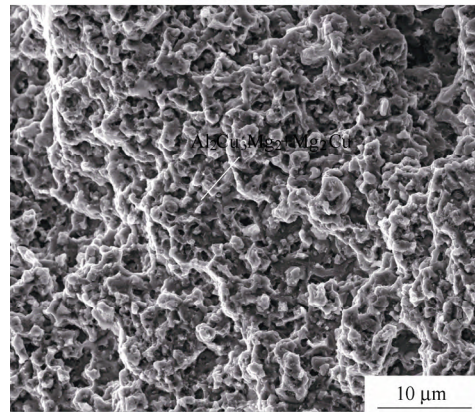
(b) 图7a放大图



(c) 镁母材侧断口形貌



(a) 焊缝侧断口形貌



(d) 图7c放大图

图7 镍铝青铜焊丝点焊后焊接试件断口形貌

可见断口处没有撕裂楞,接头为脆性断裂,经过成分分析发现,断口处主要是 $\text{Al}_2\text{Cu}_3\text{Mg}_2$ 和 Mg_2Cu 混合的金属间化合物,该金属间化合物属于脆性相,因此在承受载荷时,容易在此断裂。这种脆性的金属间化合物是造成焊接接头力学性能差以及容易在熔合区断裂的主要原因。

图 8 为表 2 中的焊接接头拉伸试验结果,可看出随着镁板孔径的增大,使用镍铝青铜焊丝点焊后的接头的最大抗拉载荷先增大后减小,且当镁板孔径为 5 mm 时接头的最大抗拉载荷达到最大为 3.4 kN。因为采取图 1 的焊接装置,使得焊接接头处的焊缝金属如同铆钉一样连接镀锌钢板和镁合金板,而当镁板孔径增大时焊点和镁合金处的熔合区体积增大,接头被铆接的更加牢固导致接头在拉伸时的最大抗拉载荷也随之增加,而当镁板孔径大于 5 mm 时,焊接时填充的焊缝金属量不能填满镁板孔径,使得接头的抗拉载荷降低。

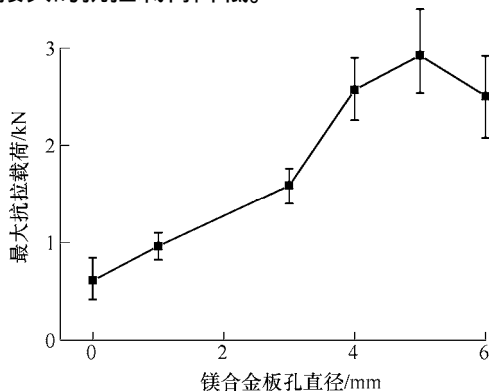


图 8 镁板孔径对镍铝青铜焊丝点焊接头力学性能的影响

5 焊接接头的连接机理

根据上面对熔合区组织的观察分析,可知熔合区主要是由块状的金属间化合物($\text{Al}_2\text{Cu}_3\text{Mg}_2+\text{Mg}_2\text{Cu}$)、共晶相 A($\alpha\text{-Mg}$ 和 Mg_2Cu 的共晶相)以及共晶相 B($\alpha\text{-Mg}$ 和 $\text{Al}_2\text{Cu}_3\text{Mg}_2$ 的共晶相)构成,其分布示意图如图 9 所示。

综上所述,采用镍铝青铜焊丝点焊镁/镀锌钢板时,在焊接接头的熔合区容易生成脆性的金属间化合物,导致力学性能较差。

6 结论

(1) 采用冷金属过渡技术焊接方法,使用镍铝青铜焊丝能够实现镁/裸钢异种金属的连接,焊缝金属在镀锌钢板上能够很好地润湿铺展且两者之间结合紧密。

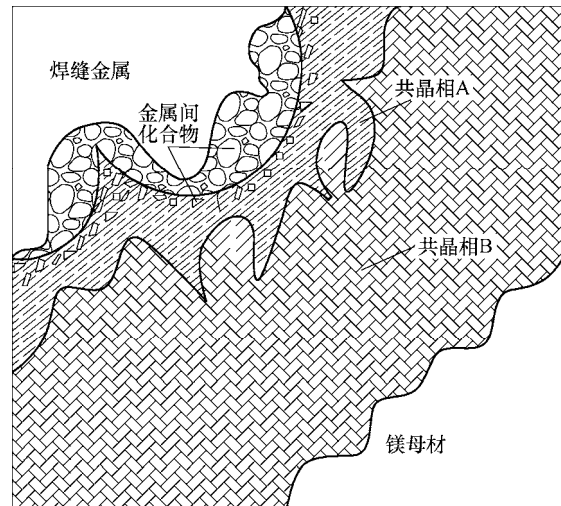


图 9 熔合区微观组织分布示意图

(2) 通过微观组织分析发现,镁/钢板焊接接头的熔合区和焊缝主要由 $\alpha\text{-Cu}$ 和 CuAl_2 组成,熔合区是由镁的固溶体 $\alpha\text{-Mg}$ 以及 $\text{Al}_2\text{Cu}_3\text{Mg}_2$ 和 Mg_2Cu 混合的金属间化合物组成。

(3) 镁板上的孔直径对镁钢接头性能有很大的影响。随着镁板孔径的增大,使用镍铝青铜焊丝点焊后的接头的最大抗拉载荷先增大后减小,且当镁板孔径为 5 mm 时接头的最大抗拉载荷达到最大为 3.4 kN。

(4) 焊缝金属和镁母材的连接处即熔合区存在大量脆性的金属间化合物,使得镁/钢接头整体力学性能较差。

参 考 文 献

- [1] 陈军. 镁合金在汽车工业中应用与分析[J]. 材料研究与应用, 2010, 4(6): 81-84.
CHEN Jun. Application analysis of magnesium alloy in automotive industry[J]. Materials Research and Application, 2010, 4(6): 81-84.
- [2] 张婷婷, 王文先, 袁晓丹, 等. Mg/Al 合金爆炸焊连接及其界面接合机制[J]. 机械工程学报, 2016, 52(12): 52-58.
ZHANG Tingting, WANG Wenxian, YUAN Xiaodan, et al. Interface bonding mechanism of Mg/Al alloy explosive welded[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(12): 52-58.
- [3] 王亚荣, 滕文华, 余洋, 等. 铝/钛异种金属的电子束熔钎焊[J]. 机械工程学报, 2012, 48(20): 88-92.
WANG Yarong, TENG Wenhua, YU Yang, et al. Electron beam welding-brazing of Al/Ti dissimilar alloys[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(20): 88-92.
- [4] 苗玉刚, 韩端峰, 姚竞争. 镁/钢异种金属激光深熔钎焊工艺特性[J]. 焊接学报, 2011, 32(1): 45-48.

- MIAO Yugang , HAN Duanfeng , YAO Jingzheng. Welding characteristic of laser welding-brazed Mg/steel dissimilar alloys[J]. Transactions of the China Welding Institution , 2011 , 32(1) : 45-48.
- [5] 黄勇兵,李建萍,黄春平,等. 镁和钢搅拌摩擦焊接头组织分析[J]. 焊接学报, 2013 , 34(5) : 67-70.
HUANG Yongbing , LI Jianping , HUANG Chunping , et al. Microstructure of friction stir welded joint of magnesium and steel[J]. Transactions of the China Welding Institution , 2013 , 34(5) : 67-70.
- [6] PIERRE D , VIALA J C , PERONNET M , et al. Interface reactions between mild steel and liquid Mg-Mn alloys[J]. Material Science and Engineer A , 2003 , 34(9) : 256-264.
- [7] 曹睿,余建永,陈剑虹,等. 镁/镀锌钢板 CMT 熔钎焊连接机制分析[J]. 焊接学报, 2013 , 34(9) : 21-24.
CAO Rui , YU Jianyong , CHEN Jianhong , et al. Bonding mechanism of CMT fusion-brazed joints between magnesium and galvanized steel[J]. Transactions of the China Welding Institution , 2013 , 34(9) : 21-24.
- [8] LIU L , XIAO L , FENG J , et al. Bonding of immiscible Mg and Fe via a nanoscale Fe_2Al_5 transition layer[J]. Scr. Mater. , 2011 , 65 : 982-985.
- [9] LIU L , XIAO L , FENG J C , et al. The mechanisms of resistance spot welding of magnesium to steel[J]. Metall. Mater. Trans. A , 2010 , 41A : 2651-2661.
- [10] SCHNEIDER C , WEINBERGER T , INOUE J , et al. Characterization of interface of steel/magnesium FSW[J]. Sci. Technol. Weld. Joining , 2011 , 16 : 100-116.
- [11] CHEN Y C , NAKATA K. Effect of surface states of steel on microstructure and mechanical properties of lap joints of magnesium alloy and steel by friction stir welding[J]. Sci. Technol. Weld. Joining , 2010 , 15 : 293-298.
- [12] JANA S , HOVANSKI Y , GRANT G J. Friction stir lap welding of magnesium alloy to steel : A preliminary investigation[J]. Metall. Mater. Trans. A , 2010 , 41A : 3173-3182.
- [13] REN D , LIU L. Interface microstructure and mechanical properties of arc spot welding Mg-steel dissimilar joint with Cu interlayer[J]. Mater. Des. , 2014 , 59 : 369-376.
- [14] PATEL V K , BHOLE S D , CHEN D L. Characterization of ultrasonic spot welded joints of Mg-to-galvanized and ungalvanized steel with a tin interlayer[J]. J. Mater. Process. Tech. , 2014 , 214 : 811- 817.
-
- 作者简介：曹睿，女，1977年出生，博士，教授，博士研究生导师。主要研究方向为金属焊接性以及异种金属焊接，发表论文 80 余篇。
E-mail : caorui@lut.cn