

镀锌钢表面状态对镁/镀锌钢MIG焊焊接性的影响

尚作先, 汪晓勇, 彭红兵, 白妮, 张天顺

江苏科技大学张家港校区冶金工程学院 江苏张家港 215600

摘要: 镁/镀锌钢复合结构件设计和使用可有效降低结构和车身质量, 是汽车轻量化发展的热门研究方向之一。为了揭示镁/镀锌钢MIG焊中镀锌层的作用, 通过对比未处理、硝酸腐蚀、机械打磨3种镀锌钢表面状态所得MIG焊接头的焊缝成形、界面组织、显微硬度和耐蚀性, 开展了镀锌钢表面状态对镁/镀锌钢MIG焊焊接性的影响的研究。研究结果表明: 镀锌层的存在有利于改善液态镁合金在钢表面的润湿铺展性, 有利于界面区的氧化物夹杂的溢出, 促进界面反应进行和界面过渡层的形成, 且部分Zn元素可进入焊缝区参与焊缝合金化, 因此镀锌钢未处理时所得接头焊缝成形美观, 界面过渡层均匀连续, 无焊接缺陷产生, 焊缝区硬度升高, 界面区耐蚀性最佳。在此基础上建立了镁/镀锌钢MIG焊中镀锌层的作用模型, 可为揭示镁/镀锌钢焊接机理、改善镁/镀锌钢焊接性, 以及提高镁/镀锌钢焊接质量提供一定的理论支持, 具有重要的研究意义和应用价值。

关键词: 表面状态; 镁/镀锌钢; MIG焊; 焊接性

The influence of surface conditions of galvanized steel on the weldability of magnesium/galvanized steel MIG welding

SHANG Zuoxian, WANG Xiaoyong, PENG Hongbing, BAI Ni, ZHANG Tianshun

School of Metallurgical Engineer, Jiangsu University of Science and Technology, Zhangjiagang 215600, Jiangsu, China

Abstract: The design and use of magnesium/galvanized steel composite structural components can effectively reduce the weight of the structures and body, and is one of the hot researches for the development of lightweight automotive. In order to reveal the role of Zn layer in magnesium/galvanized steel MIG welding process, this paper compared the weld formation, interface microstructures, microhardness, and corrosion resistance of MIG welded joints obtained from untreated, nitric acid corrosion, and mechanical polishing galvanized steel surface conditions. The study investigated the influence of galvanized steel surface state on the weldability of magnesium/galvanized steel MIG welding. The research results indicated that the presence of Zn layer is beneficial for improving the wetting and spreading properties of liquid magnesium alloy on the steel surface, facilitating the overflow of oxide inclusions in the interface area, promoting interface reaction and the formation of interface transition layer. Moreover, some Zn elements can enter the weld seam area to participate in weld seam alloying. Therefore, the joint weld seam formed by untreated galvanized steel is beautiful, the interface transition layer is uniform and continuous, without welding defects, and the hardness of the weld seam area increases, and the interface area has the best corrosion resistance.

基金项目: 江苏省自然科学基金青年项目 (BK2020997)。

通信作者: 汪晓勇, 讲师, 主要研究方向为异种金属材料焊接, E-mail: psdq625@126.com。

On this basis, a model of the action of Zn layer in magnesium/galvanized steel MIG welding was established, which can provide theoretical support for revealing the welding mechanism of magnesium/galvanized steel, improving the weldability of magnesium/galvanized steel, and improving the welding quality of magnesium/galvanized steel. It has important research significance and application value.

Keywords: surface conditions; magnesium/galvanized steel; MIG welding; weldability

1 序言

随着能源危机和环境污染问题的不断加剧,节能和环保成为关系国计民生的重大问题。调查显示,汽车尾气是当今空气污染的最大污染来源之一^[1, 2];在石油的总消耗量中,仅汽车行业就占据30%以上^[3]。因此,为了降低能源消耗以及减少污染气体的排放,在满足强度要求的前提下,车身轻量化已然成为汽车工业科技发展的必然趋势^[4]。目前,美国通用、日本丰田与本田等大型汽车企业都在大力推行车身轻量化的生产技术,其手段主要有两种:一是在非承载结构处采用轻质合金,如镁合金、铝合金代替原有钢结构;二是在承载结构处采用更轻薄的第三代高强钢,在保证安全性的同时降低车身的重量。因此,异种材料连接是未来汽车车身焊接的发展趋势之一^[5, 6],随之而来的镁/钢等异种材料的焊(连)接成为亟待解决的问题。

SCHNEIDER等^[7]开展了AZ31B镁合金/DX54D镀锌钢异种材料的搅拌摩擦焊研究,在较高的焊接速度下所得接头的界面处检测到了共晶层,接头强度较高,拉伸载荷可达8.2kN;在较低的焊接速度下则没有检测出共晶层,接头强度显著降低。SCHNEIDER等认为钢板表面的镀锌层起到了助溶剂的作用,增强了钢板表面的活性,而且Zn与Mg反应形成了Mg-Zn共晶组织。CHEN等^[8-10]在镁合金/镀锌钢和镁合金/未镀锌钢的对比研究中发现,镀锌层的存在促进了界面低熔点的Mg-Zn共晶组织形成,共晶组织在搅拌头高压作用下与污染物、氧化物一起被挤压出焊接区,促进Mg、Fe之间相互扩散和镁/钢冶金结合。经对ZEK100镁合金/DP600镀锌钢搅拌摩擦点焊^[11]研究表明,镁/钢界面附近生成了连续的FeAl₂,接头的最大剪切载荷可达4.7kN。

曹睿等^[12-17]进行了AZ31B 镁合金/镀锌钢冷金属过渡焊接。研究结果表明,镁/钢接头具有典型的熔钎焊特征,液态镁合金钎料在钢表面润湿铺展、扩

散反应形成界面层来实现镁/钢冶金结合;镀锌层的存在能够提高镁合金钎料的润湿铺展能力,且镀锌层的蒸发会降低钢表面温度、防止钢发生熔化;然而镀锌层会使界面形成 α -Mg+MgZn共晶,降低接头的强度。洪森等^[18, 19]采用非熔化极惰性气体保护焊焊接了AZ31B/镁合金/HSLA350镀锌钢,物相分析结果显示,镁/钢焊缝区形成了Mg₃₂(Zn,Al)₄₉,界面区主要由Mg-Al-Zn 金属间化合物组成,接头最大拉伸载荷可达227N/mm。KANG等^[20]采用CMT焊接方法展开对镀锌钢、镀锌-退火钢、冷轧裸钢和镀铝钢4种不同表面状态的钢与AZ31镁合金焊接性研究。研究表明,采用镀锌钢、镀锌-退火钢时,镀锌层存在可促进润湿铺展,然而其与Mg反应形成的 α -Mg+Mg-Zn共晶组织与Fe-Al相的结合较弱,弱化了界面的连接;采用冷轧裸钢和镀铝钢时,镁合金在钢板上的润湿性稍差,而原有的Fe-Al 相和新形成的Fe-Al 相均有利于界面处的冶金结合,界面附近的Al含量对过渡层的形成影响显著。

综上可知,钢板表面的锌镀层对镁/钢焊接起到了一定作用,但其作用过程和作用机理还未达成共识。鉴于此,本文通过改变镀锌钢表面状态,深入研究镀锌钢表面状态其对镁/钢MIG焊接性的影响,揭示镀锌层的作用和作用机制。

2 试验材料与方法

本文选用3mm厚的AZ31B镁合金板和DX51D镀锌钢板作为焊接母材,尺寸为100mm×50mm×3mm,选用AZ31镁合金焊丝作为填充金属。两种母材和焊丝的化学成分分别见表1~表3。镀锌钢的金相组织是铁素体与珠光体,晶粒在垂直轧制方向略有拉长,其晶粒尺寸为30~50 μ m,表面为热浸镀锌层,镀锌层厚度为10~20 μ m(内层为厚度不足1 μ m的Fe-Al层)。AZ31B镁合金金相组织主要由等轴的 α -Mg固溶体组成,其晶粒尺寸为35~50 μ m。

表1 DX51D镀锌钢的化学成分(质量分数) (%)

C	Si	Mn	P	S	Alt	Fe
0.07	≤0.03	≤0.50	≤0.025	≤0.025	≥0.020	余量

表2 AZ31B镁合金的化学成分(质量分数) (%)

Al	Zn	Ca	Cu	Ni	Si	Fe	Mg
2.5~3.5	0.5~1.5	0.04	0.05	0.005	0.10	0.005	余量

表3 AZ31镁合金焊丝的化学成分(质量分数) (%)

Al	Zn	Cu	Ni	Mn	Si	Mg
3.13	0.71	0.005	0.001	0.35	0.005	余量

选用OTC DP400型MIG焊机进行试验。焊接电流为120A,电弧电压为21V,送丝速度为5.4m/min,焊接速度为500mm/min。对镀锌钢表面进行处理,机械打磨去除所有表面层获得裸钢,化学处理除去镀锌层保留Fe-Al层,研究镀锌钢表面状态对镁/镀锌钢MIG焊接头微观组织和性能的影响。不同表面状态镀锌钢如图1所示,焊接过程如图2所示。



a) 未处理



b) 硝酸腐蚀



c) 机械打磨

图1 不同表面状态镀锌钢

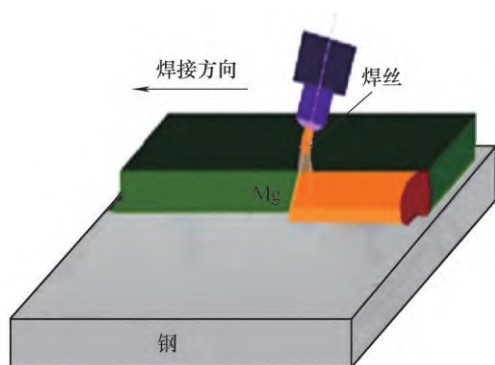


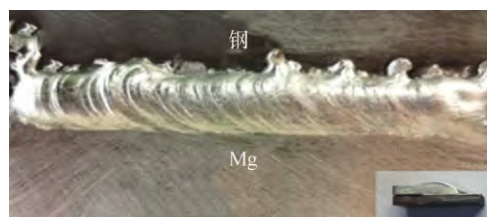
图2 焊接过程示意

金相试样打磨、抛光后,用4%的硝酸酒精进行腐蚀。用Axio Scope. AI蔡司显微镜和JSM-6510LA扫描电镜观察镁/镀锌钢MIG焊接头微观组织;用HXD-1000TMSC/LCD显微硬度计检测接头的硬度,用CHI660D电化学站进行电化学腐蚀试验(电解液为3.5%NaCl溶液)。

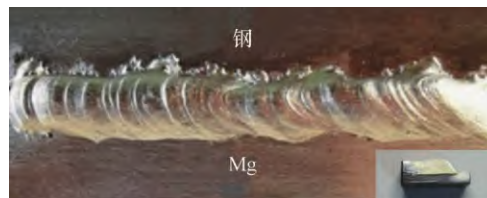
3 试验结果及分析

3.1 镀锌钢表面状态对焊缝形成的影响

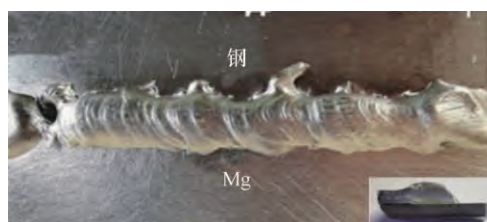
镀锌钢表面状态对镁/镀锌钢MIG焊接头焊缝形成的影响如图3所示。由图3可看出,不同表面状态所得焊接接头的焊缝成形存在显著差别,镀锌钢未处理时所得焊缝鱼鳞纹连续、致密,焊缝宽度一致,镁合金铺展较好,成形较为美观(见图3a);镀锌钢硝酸腐蚀后所得焊缝均匀性变差,鱼鳞纹不太均匀,镁合金铺展效果变差(见图3b);镀锌钢机械打磨后所得焊缝成形最差,鱼鳞纹极不均匀,焊缝高度和宽度不均,出现大尺寸焊瘤,镁合金堆积严重(见图3c)。对比不同表面状态下液态镁合金在钢表面的润湿铺展情况可知,镁合金在未处理镀锌钢和硝酸腐蚀镀锌钢上铺展较好,在镀锌钢机械打磨后的裸钢上铺展最差。因此可知,镀锌层可有效促进液态镁合金的润湿铺展性,改善焊缝成形。



a) 未处理



b) 硝酸腐蚀

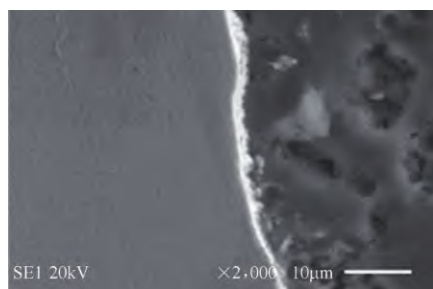


c) 机械打磨

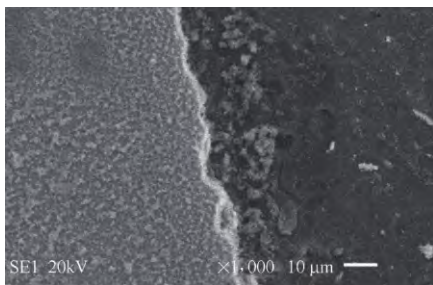
图3 镀锌钢不同表面状态下的焊缝成形

3.2 镀锌钢表面状态对界面组织的影响

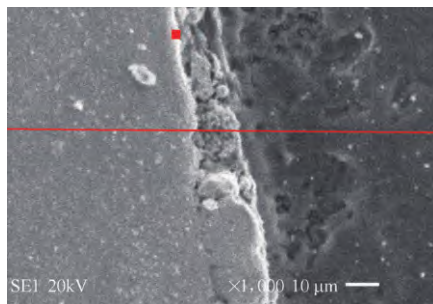
镀锌钢表面状态对镁/镀锌钢MIG焊接头界面组织结构的影响如图4所示。由图4可看出,在镁/镀锌钢MIG焊接头界面处形成了白色的过渡层,镁合金与镀锌钢通过形成界面过渡层来实现冶金结合。不同表面状态影响着界面过渡层的厚度和形态,未处理镀锌钢界面过渡层连续,厚度较大(见图4a);镀锌钢硝酸腐蚀后所得接头界面过渡层连续,但厚度相对较小(见图4b);镀锌钢机械打磨后所得接头界面过渡层不均匀、不连续,在界面附近堆积了大量反应产物(见图4c)。



a) 未处理



b) 硝酸腐蚀

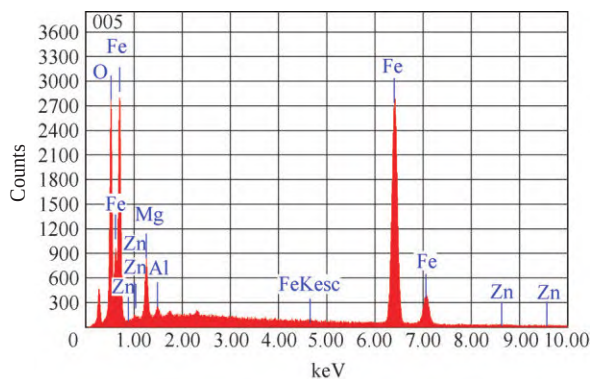


c) 机械打磨

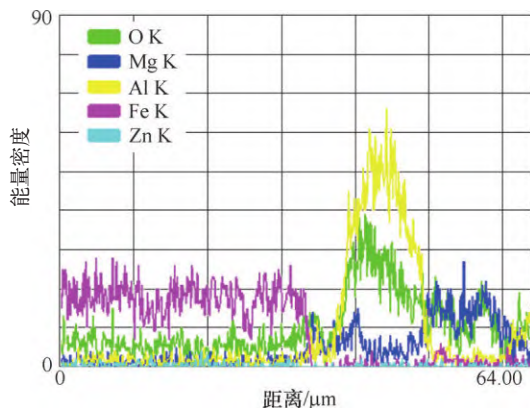
图4 镀锌钢不同表面状态下的接头界面组织形貌

基于前期研究可知,镁/镀锌钢MIG焊接头界面过渡层主要由Fe-Al化合物组成图4c中界面处点分析能谱图和线扫描结果如图5所示。结合图5可知,镀锌钢机械打磨后所得接头界面的反应产物中O含量明显增加,说明其主要是氧化物夹杂。在镁/镀锌钢

MIG焊接头界面区,Mg、Fe不发生反应,镁合金中的合金元素,尤其是Al元素在向界面扩散、聚集并与Fe反应,因此界面过渡层的形态和厚度是受液态镁合金的润湿铺展性和界面反应影响的,液态镁合金在未处理镀锌钢表面润湿铺展较好,界面反应充分,界面过渡层连续,且厚度较大;液态镁合金在硝酸腐蚀后的镀锌钢表面润湿铺展稍差,界面过渡层厚度减小;液态镁合金在机械打磨后镀锌钢表面润湿铺展极差,界面反应不充分,界面过渡层成形差,且焊接过程产生的氧化物不容易溢出焊接区,造成氧化物夹杂,引起界面脆化和微裂纹的形成(见图6),严重恶化镁/镀锌钢MIG焊质量。



a) 点分析能谱图

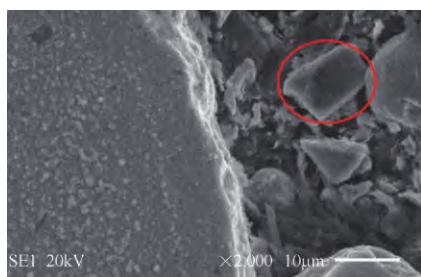


b) 线扫描结果

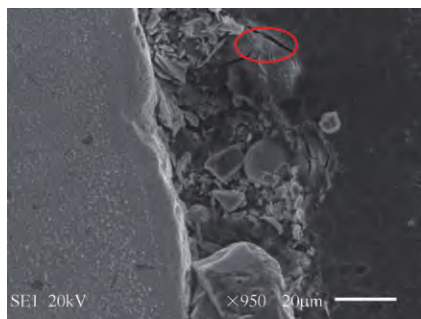
图5 图4c中界面处点分析能谱图和线扫描结果

3.3 镀锌钢表面状态对接头显微硬度的影响

镀锌钢表面状态对镁/镀锌钢MIG焊接头显微硬度的影响如图7所示。由图7可看出,镁/镀锌钢MIG焊接头硬度分布是不均匀的,镁合金焊缝区、热影响区、母材区3个区域显微硬度稍有起伏但差别不大,在界面处硬度最高;与硝酸腐蚀和机械打磨所得接头相比,未处理镀锌钢所得接头焊缝区显微硬



a) 夹杂



b) 裂纹

图6 镀锌钢机械打磨后所得接头界面夹杂和裂纹缺陷

度较母材有所升高,界面区硬度差别较小。镁/镀锌钢接头显微硬度分布的上述特点主要与接头微观组织演变有关。镁合金焊缝区、热影响区、母材区3个区域显微硬度的起伏可能与析出相的变化有关,未处理镀锌钢表面Zn熔化后,进入镁合金焊缝区,促进析出相的形成,使得焊缝区显微硬度增加;由于镁/镀锌钢界面区存在大量脆硬的Fe-Al金属间化合物,使界面区的显微硬度明显升高。镁/镀锌钢MIG焊接接头显微硬度分布的不均匀性是影响焊接性的重要因素,界面硬度高、脆性大,是镁/镀锌钢MIG焊接接头薄弱区。焊接接头断裂均发生于界面处,最大拉剪强度为3.8kN。

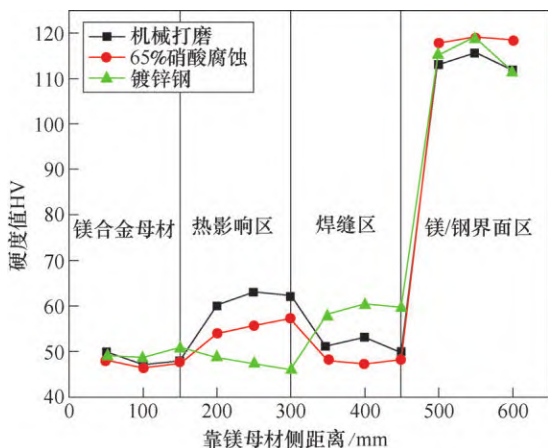


图7 镀锌钢不同表面状态下所得接头显微硬度曲线

3.4 镀锌钢表面状态对接头耐蚀性的影响

镀锌钢不同表面状态下所得接头动电位极化曲线如图8所示,其动电位极化曲线测得的电化学参数见表4。由图8、表4可看出,镀锌钢表面状态对镁/镀锌钢MIG焊接接头电化学参数有显著影响,镀锌钢未处理时所得接头 I_{corr} (腐蚀电流密度)最低,当镀锌钢经过硝酸腐蚀或机械打磨后,所得接头的 I_{corr} 明显升高。 I_{corr} 是材料腐蚀的快慢程度的体现, I_{corr} 越小,代表腐蚀反应进行的越缓慢,反之, I_{corr} 越大,腐蚀反应进行的越剧烈。因此,可以断定当镀锌钢未处理时所得接头的耐蚀性最佳。

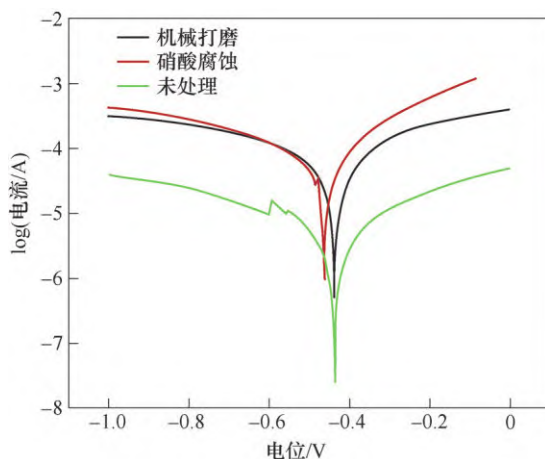


图8 镀锌钢不同表面状态下所得接头动电位极化曲线

表4 不同表面状态所得接头极化曲线拟合得出的电化学参数

钢表面处理状态	E_{corr} (vsSCE)	I_{corr} (A/cm ²)
机械打磨	-0.44	0.00004175
硝酸腐蚀	-0.464	0.00004455
未处理	-0.438	0.000002975

镀锌钢不同表面状态下所得镁/镀锌钢MIG焊接接头界面处腐蚀形貌如图9所示。从图9可发现,镁/镀锌钢界面区总体腐蚀都比较严重,尤其是靠近镁侧区域,已经严重腐蚀,界面处都存在沟槽。分析认为,低电位的焊缝区域作为阳极与钢发生电偶腐蚀,同时界面化合物又作为阴极和焊缝也发生电偶腐蚀,导致低电位的焊缝金属发生了氧化反应,使腐蚀速率变快,而处于高电位的钢则发生还原反应,腐蚀速率相对慢些,因此界面层靠近镁侧焊缝区的腐蚀较为严重。镁/镀锌钢MIG焊接接头耐蚀性与界面组织有密切关系,未处理镀锌钢所得接头形成了连续均匀过渡层,耐蚀性较好;镀锌钢硝酸腐

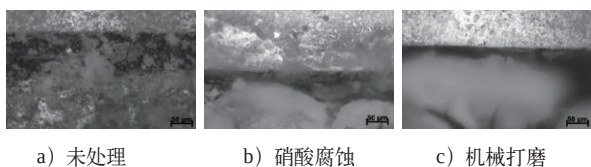


图9 镀锌钢不同表面状态下所得接头腐蚀形貌

蚀后所得接头界面过渡层厚度减小, 均匀性变差, 耐蚀性变差; 镀锌钢机械打磨后所得接头界面连续性差, 存在夹杂缺陷, 降低了接头的完整性和连续性, 严重恶化了接头的耐蚀性, 腐蚀最为严重。因此, 镁/镀锌钢MIG焊时表面镀锌层的存在有利于接头耐蚀性的提高。

3.5 镀锌钢中锌层的作用及作用模型

基于以上研究可知, 镀锌钢表面锌层对于改善镁/钢焊接性和提高镁/钢连接质量起到重要的作用。Zn 元素有利于镁合金在钢表面润湿铺展, 促进界面反应进行和界面过渡层的形成; 锌熔化后, 可将界面区的氧化物夹杂带离焊缝区, 提高界面连接质量。其作用过程及作用模型如图10所示。在MIG电弧热作用下, 镀锌层和镁合金开始熔化, Zn 元素与熔融镁合金相接触, 降低了镁在钢表面的润湿角, 促进了镁合金在钢表面润湿铺展 (见图10a); 少部分Zn元素进入镁合金焊缝区, 大部分 Zn元素裹挟着镁合金表面氧化膜破裂后的微小碎片上浮到熔池的表面, 与此同时, 钢侧母材中的 Fe 原子开始向液态镁合金熔池溶解扩散, 在钢侧的接头界面区形成了富铁层 (见图10b); 熔融镁合金熔池中的 Al 元素开始向富铁层扩散聚集, 界面区Fe、Al含量不

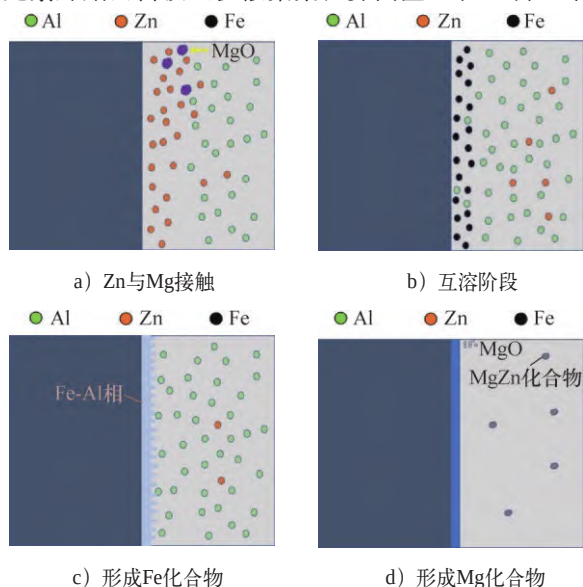


图10 锌层作用过程及作用模型

断增加, 在焊接电弧高温作用下, Fe、Al反应形成了 Fe-Al化合物层 (见图10c)。与此同时, 在镁合金焊缝区中, Zn、Mg结合, 形成了Mg-Zn 化合物 (见图10d)。

4 结束语

1) 镀锌钢表面状态影响镁/镀锌钢MIG焊接头焊缝成形, 镀锌钢未处理时所得镁/镀锌钢MIG焊接头焊缝成形较为美观, 镁合金在钢表面铺展较好。

2) 镀锌钢表面状态影响镁/镀锌钢MIG焊接头界面组织结构, 镀锌钢未处理时所得接头界面过渡层连续、均匀, 厚度较大; 镀锌钢硝酸腐蚀后所得接头界面过渡层厚度减小; 镀锌钢机械打磨后, 界面过渡层成形差, 界面区存在大量氧化物夹杂, 引起脆性增加和微裂纹产生。

3) 由于形成了脆性Fe-Al相和存在夹杂缺陷, 因此镁/镀锌钢MIG焊接头界面区硬度最大; 镀锌钢未处理时所得镁/镀锌钢MIG焊接头耐蚀性最佳。

参考文献:

- [1] ZHANG W, ZHANG Y, JIA Z, et al. Test method and material design of asphalt mixture with the function of photocatalytic decomposition of automobile exhaust[J]. Construction and Building Materials, 2019, 215: 298-309.
- [2] 姚厅厅. 汽车尾气污染与控制研究[J]. 黑龙江环境通报, 2020, 33 (2): 58-59.
- [3] 吴兆辉. 汽车轻量化及铝合金在现代汽车生产中的应用[J]. 内燃机与配件, 2022 (23): 106-108.
- [4] XIONG F, WANG D, MA Z, et al. Lightweight optimization of the front end structure of an automobile body using entropy-based grey relational analysis[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2019, 233 (4): 917-934.
- [5] 李红, 刘旭升, 张宜生, 等. 新能源电动汽车异种材料连接技术的挑战、趋势和进展[J]. 材料导报, 2019, 33 (23): 3853-3861, 3881.
- [6] 吴丹, 韦超毅. 汽车用钢铝异种材料的自冲铆接工艺智能优化[J]. 锻压技术, 2021, 46 (2): 117-123.
- [7] SCHNEIDER C, WEINBERGER T, INOUE J, et al. Characterisation of interface of steel/magnesium FSW[J]. Science & Technology of Welding &

- Joining, 2011, 16 (1) : 100-106.
- [8] CHEN Y, 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]. Science & Technology of Welding & Joining, 2010, 15 (4) : 293-298.
- [9] CHEN Y, NAKATA K. Effect of tool geometry on microstructure and mechanical properties of friction stir lap welded magnesium alloy and steel[J]. Materials & Design, 2009, 30 (9) : 3913-3919.
- [10] CHEN Y, NAKATA K. Friction stir lap welding of magnesium alloy and zinc-coated steel[J]. Materials Transactions, 2009, 50 (11) : 2598-2603.
- [11] CHEN Y, CHEN J, AMIRKHIZ B S, et al. Microstructures and properties of Mg alloy/DP600 steel dissimilar refill friction stir spot welds[J]. Science & Technology of Welding & Joining, 2015, 20 (6) : 494-501.
- [12] CAO R, XU Q W, ZHU H X, et al. Weldability and distortion of Mg AZ31-to-galvanized steel spot plug welding joint by cold metal transfer method[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering-Transactions of the ASME, 2016, 139 (2) .DOI: 10.1115/1.4034009L.
- [13] CAO R, CHANG J, HUANG Q, et al. Behaviors and effects of Zn coating on welding-brazing process of Al-Steel and Mg-steel dissimilar metals[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 31: 674-688.
- [14] CAO R, ZHU H, WANG Q, et al. Effects of zinc coating on magnesium alloy-steel joints produced by cold metal transfer method[J]. Materials Science and Technology, 2016, 32 (18) : 1805-1817.
- [15] CAO R, YU J, CHEN J, et al. Feasibility of cold-metal-transfer welding magnesium AZ31 to galvanized mild steel[J]. Welding Journal, 2013, 92 (9) : 274S-282S.
- [16] 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.
- [17] 朱海霞, 曹睿, 李雅范, 等. 镁-裸钢板异种金属冷金属过渡熔钎焊连接机理[J]. 焊接学报, 2016, 37 (5) : 77-80.
- [18] 洪森. 镁合金/镀锌钢TIG 熔-钎焊参数及焊后处理对接头组织与力学性能的影响[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- [19] YUAN X J, LIANG X B, LI X Y, et al. Microstructure and mechanical property of brazed joints in titanium alloy and aluminum alloy combination with tin foil interlayer[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2015, 16 (7) : 1293-1297.
- [20] KANG M, KIM C, KIM Y M. Joining of AZ31 magnesium alloy and steel sheet under four different coating conditions based on gas metal arc weld-brazing[J]. Materials Transactions, 2017, 58 (1) : 95-102.

MW 20240402

(上接第21页)

通过氩弧焊进行焊接固定,就完全能满足生产工艺和过炉纤焊要求^[5]。

另外,利用优化后的新型支架、压板装配一套此产品组件(左右集流管合件)仅需50s,与原采用氩弧焊焊接形式对比,生产效率提高了近300%。同时这种压装固定方式,支架、压板与集流管间无焊点,这样也大幅提高了产品质量,降低了由原氩弧焊焊接击穿集流管带来的产品质量隐患。

4 结束语

经验证,以上改进措施取得了成功,类似的压板、支架均可采用这种新型结构与集流管组合,无需氩弧焊焊接,现已推广到PN100等近10个产品上

使用,效益显著。

参考文献:

- [1] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册(第1卷): 焊接方法及设备[M]. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [2] 成大先. 机械设计手册(第1卷) [M]. 5版. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- [3] 赵世臣. 常用金属材料手册[M]. 2版. 北京: 冶金工业出版社, 1996.
- [4] 轻金属材料加工手册编写组. 轻金属材料加工手册(上册) [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1979.
- [5] 张启运. 钎焊文集[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2009.

MW 20240407