

铝/钢异种金属焊接接头腐蚀行为及其影响因素综述

徐灏，曹睿，樊丁

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

摘要: 铝/钢异种金属焊接接头结合了两种材料优异的性能, 在各行各业具有较为广泛的应用。由于铝、钢两种金属之间理化性能的巨大差异以及极小的固溶度, 导致铝/钢接头容易出现脆性金属间化合物、气孔等缺陷, 严重影响着接头的力学性能。然而, 随着铝/钢接头越来越广的应用范围和复杂多样的应用环境, 接头的耐腐蚀性能也得到了更多的关注。对近些年铝/钢异种金属焊接接头的耐腐蚀方面研究工作做了系统的汇总, 旨在从接头腐蚀机理出发, 提升接头的耐腐蚀性。综述了接头腐蚀形式规律, 并从焊接工艺、腐蚀环境、微观组织和金属间化合物等影响因素的角度出发, 详细地讨论了腐蚀行为与各因素之间的关系及影响机理。同时, 指出了接头腐蚀机理, 从各影响因素方面提出了改善接头耐腐蚀性能的措施, 减小铝/钢接头实际服役过程中腐蚀所带来的影响。

创新点: (1) 系统地总结了铝/钢异种金属焊接接头腐蚀行为及影响因素。

(2) 从不同角度详细地探讨了铝/钢接头的腐蚀机理, 并提出了改善接头耐蚀性能的措施。

关键词: 铝/钢焊接接头; 腐蚀行为; 微观组织; 金属间化合物

中图分类号: TG 457.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20230718001

Corrosion behavior of aluminum/steel dissimilar metal welded joints and influential factors: A review

XU Hao, CAO Rui, FAN Ding

(State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, 730050, China)

Abstract: Aluminum/steel dissimilar metal welded joints combine the excellent properties of the two materials and have a wide range of applications in various industries. Due to the great difference in physical, chemical properties and the extremely small solid solubility between aluminum and steel. Aluminum/steel joints are prone to defects such as brittle intermetallic compounds and pores, which seriously affect the mechanical properties of the joints. However, the corrosion resistance of aluminum/steel joints has also received more attention with the increasing applicable and complex applicable environments. This paper systematically summarizes the research work on the corrosion behavior of aluminum/steel dissimilar metal welded joints in recent years, aiming to improve the corrosion resistance of joints based on the corrosion mechanism. This paper summarizes the joint corrosion forms, and discusses the relationship and influence mechanism between corrosion behavior and various factors such as welding process, corrosion environment, microstructure and intermetallic compounds. At the same time, the corrosion mechanism of the joint is pointed out, and the measures to improve the corrosion resistance of the joint are put forward from the aspects of various influencing factors, so as to reduce the influence of corrosion in the actual service process of the aluminum/steel joint as much as possible.

Highlights: (1) The corrosion behavior and influencing factors of aluminum/steel dissimilar metal welded joints were systematically summarized.

(2) The corrosion mechanism of aluminum/steel joints was discussed in detail from different aspects, and the measures to improve the corrosion resistance of joints were put forward.

Key words: Aluminum/steel dissimilar joints; corrosion behavior; microstructure; intermetallic compounds

0 序言

目前,减少温室气体的排放和提高燃料效率,已经得到人们广泛的关注。美国环保局(EPA)研究发现,交通运输行业的温室气体排放占很大的比重。国内每年汽车保有量增长速率较高,这给环境资源带来较大的压力^[1,2]。在汽车工业中,生产材料的轻量化是解决这一问题的关键。铝合金具有重量轻,比强度高,塑韧性好,耐腐蚀性好等优点,采用铝合金替代交运工具所使用的钢材,可以有效的减轻其质量,从而降低汽车在服役期间的温室气体的排放量,因此,铝/钢异种金属复合结构的使用变得不可或缺。目前大量交运工业都采用了“以铝代钢”的铝/钢复合结构,在汽车车身以及发动机支架已经应用了铝/钢结构^[3-5]。不仅如此,研究者们也探索了大量的焊接方法,例如搅拌摩擦焊,激光钎焊等来实现铝/钢异种金属焊接^[6-8]。

关于铝/钢异种金属焊接接头,已有大量的学者进行深入的研究,其中包括加工工艺、微观组织、力学性能以及应用等方面^[9-10]。然而,除了这些方面,耐腐蚀性也是影响接头服役性能的重要因素。对于铝/钢接头,已有大量的文献对其接头腐蚀行为及机理进行了阐述,一方面,通过接头形变、焊接热输入及晶粒尺寸等角度,讨论了微观组织对于铝/钢接头腐蚀行为的影响。另一方面,各种第二相和夹杂等引起接头组织不均匀,也会使得铝/钢接头腐蚀敏感性增加,造成局部腐蚀。Sravanth等人^[11]通过改变焊接速度得到了不同厚度的金属间化合物(IMC),IMC越厚腐蚀越严重。Gnedenkov等人^[12]指出接头中的铝基体(热影响区、母材)上分布的Mg-Si等相引起较高的电化学活性,造成严重的点蚀。Ma等人^[13]也指出,由于元素扩散,界面形成不同种类的IMC层,由于其腐蚀敏感性不同,外层Al-Fe-Si三元IMC层优先发生溶解。

基于此,首先对铝/钢接头的腐蚀形式和特征进行简要的介绍,随后总结了影响铝/钢接头腐蚀行为的因素,重点介绍了焊接工艺、微观组织和IMC方面的影响机理。本文有助于加深对铝/钢异种金属焊接接头腐蚀机制的认识,为改善接头耐蚀性能,延长接头服役寿命提供参考。

1 铝/钢异种金属焊接接头腐蚀形式

金属材料的腐蚀通常分为局部腐蚀和全面腐蚀,局部腐蚀又可以分为应力腐蚀开裂、点腐蚀、晶间腐蚀、腐蚀疲劳以及缝隙腐蚀等^[14]。局部腐蚀是金属构件腐蚀的主要形式,虽然这种腐蚀金属损失量不大,但是严重的局部腐蚀往往导致设备的突发性破坏,从而造成巨大的经济损失,甚至引发灾难性事故。相比于局部腐蚀来说,全面腐蚀的腐蚀作用更均匀地发生在整个金属表面上,并逐步地使表层金属溶解并降低其各项性能,无明显的腐蚀深度,带来的危害较小。

在铝/钢异种金属焊接接头中,由于两种母材之间的理化性能差异、接头形式、焊接热输入以及服役环境等各种因素的影响,焊接接头的腐蚀形式是多样的,对接头整体性能的影响程度也不同。表1^[15-28]总结了不同的铝/钢焊接接头在腐蚀环境中的腐蚀类型。从中可知,铝/钢焊接接头的腐蚀以点蚀为主,由于焊接接头形式的差异,伴随有缝隙腐蚀和应力腐蚀开裂(stress corrosion cracking, SCC)的发生^[15-16],随着腐蚀的进行,还会发生表层金属的大面积脱落,形成剥落腐蚀^[18-20]。同时,还会出现由焊接过程中元素扩散和偏析引起的晶间腐蚀^[13,25]。

焊接接头的形式以及焊接残余应力均会导致接头发生不同程度的腐蚀,例如Wang等人^[15]通过电磁脉冲焊接(MPW)获得的非镀锌钢HC340LA/AA3003搭接接头,如图1所示。在盐雾腐蚀试验中,盐雾中的Cl⁻、Na⁺和水滴在两种母材之间的缝隙中形成电解质溶液,形成小尺度的电偶腐蚀,造成铝合金内表面腐蚀氧化形成点蚀。同样,Geng等人^[16]通过浸泡腐蚀AA5052/HC420LA MPW接头后,从图2中可以看到,腐蚀以点蚀的形式在Al合金及焊缝界面区域发生,同时还在Al一侧靠近界面区域观察到了由于焊接残余应力所引起的SCC。Pan等人^[17]对比了铝/钢电阻点焊(RSW)和自穿孔铆接(SPR)两种接头在弱酸的盐雾腐蚀循环后的腐蚀形貌,观察发现两种接头均有明显的点蚀坑,但是由于SPR接头中两个母材的间隙较窄,腐蚀介质不易侵入接头内部,相比于RSW接头腐蚀程度较小。总的来说,接头形式对于腐蚀的影响是相对比较明显的,它会影响腐蚀介质的聚集程度,从而

表 1 不同焊接接头的腐蚀形式
Table 1 Corrosion form of different welded joints

| 母材 | 焊接方法 | 腐蚀溶液(质量分数) | 腐蚀类型 | 参考文献 |
|-----------------------|----------|--|--------------|------|
| AA3003/HC340LA | MPW | 5% NaCl(盐雾) | 点蚀、缝隙腐蚀 | [15] |
| AA5052/HC420LA | MPW | 5% NaCl(盐雾) | 点蚀、应力腐蚀开裂 | [16] |
| AA6022-T4/HSLA 340 | RSW、SPR | 0.90% NaCl + 0.10% CaCl ₂ + 0.075% NaHCO ₃ | 点蚀 | [17] |
| AA6082/DP600 | 无孔FSSW | 3.5% NaCl | 点蚀、剥落腐蚀 | [18] |
| 200ST/T06Z | RFSSW | 3.5% NaCl | 点蚀、剥落腐蚀、晶间腐蚀 | [19] |
| 200ST/ST06 Z | RFSSW | 3.5% NaCl | 点蚀、剥落腐蚀、晶间腐蚀 | [20] |
| AA6061-T6/Q235 | FSW | 3.5% NaCl | 点蚀、剥落腐蚀 | [21] |
| AA6061/HT590 | FSW | 3.5% NaCl | 点蚀 | [22] |
| Al/304SS | FSW | 3.5% NaCl | 点蚀 | [23] |
| AA6061/AISI304 | FSW | 3.5% NaCl | 点蚀 | [24] |
| AA6082 T6/镀锌钢 | 激光焊 | 100 mL蒸馏水中 + 3.5%NaCl + 2mL HCl + 1mL H ₂ SO ₄ | 点蚀、晶间腐蚀 | [25] |
| AA6061/DX56D + Z140MB | 激光焊 | 5% NaCl(盐雾) | 点蚀、晶间腐蚀 | [26] |
| 5052/镀锌钢 | GMAW、CMT | NaOH、HNO ₃ | 晶间腐蚀 | [27] |
| 5052/镀锌钢 | GMAW | 0.6 mol/L NaCl + 0.2 mol/L NaHSO ₃ , 水基EXCO (6.5 mol/L HNO ₃ + 50 g/L KNO ₃ + 234 g/L NaCl) | 点蚀、晶间腐蚀 | [28] |

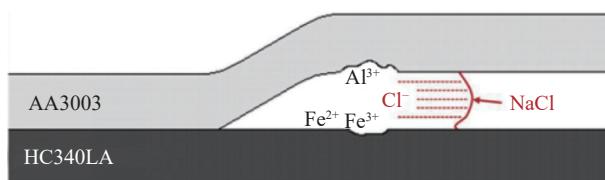


图 1 MPW 接头腐蚀的示意图^[15]

Fig. 1 Corrosion schematic diagram of MPW joint^[15]

引起接头不同部位发生不同程度的腐蚀,而这些区域的腐蚀则根据其合金表面的组织以及相的分布呈现出点蚀等腐蚀形式,同时在焊接工艺的影响下,接头中的残余应力会与腐蚀协同作用促进SCC的发生。

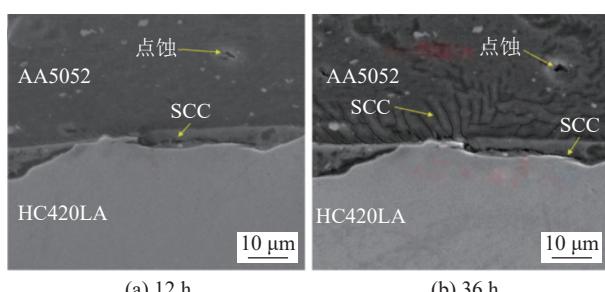


图 2 焊接接头界面浸泡腐蚀形貌^[16]

Fig. 2 Immersion corrosion morphology of welded joint interface. (a) 12 h; (b) 36 h^[16]

Zhang 等人^[18]在 6082/DP600 无孔搅拌摩擦点

焊接头的腐蚀试验后指出,腐蚀主要发生在铝合金表面,腐蚀的形式有腐蚀产物堆积及应力腐蚀开裂形成的剥落腐蚀;钝化膜的缺陷处与周围区域以及各种元素之间电偶腐蚀形成的点蚀,如图 3 所示。同样的腐蚀形式在 200ST-Al/ST06Z 镀锌钢以及 200ST-Al/ST16 非镀锌钢的回填搅拌摩擦点焊(RFSSW)接头中均有所出现。而引起这些腐蚀形式的主要原因是焊接时产生的析出相在腐蚀过程中与基体之间腐蚀电位的差异,以及接头界面和晶界上元素偏析所造成的不同区域之间腐蚀电位的差异,最终引起的电偶腐蚀,导致点蚀、晶间腐蚀以及持续腐蚀作用造成剥落腐蚀的发生^[19-20]。而通过 Mo 等人^[21]的研究,可以更加清楚的看到基体中析出相和元素偏析所引起腐蚀发生的顺序以及腐蚀形成的机理。6061Al 合金表面出现大量的点蚀归因于 Al 合金基体中分布的 Mg₂Si 相颗粒与周围的 Al 基体之间的电偶效应,使得 Mg₂Si 中的 Mg 优先溶解,剩余的 Si 与基体中的 Al、Fe 元素形成腐蚀电位较高的 Al-Fe-Si 相引起周围的 Al 基体发生溶解,从而形成大量的点蚀坑;同时,铝靠近界面区域中的富 Fe 相与周围的 Al 基体由于电偶效应引起 Al 的大面积腐蚀,形成剥落腐蚀。

两种母材之间腐蚀电位差引起宏观电偶效应,

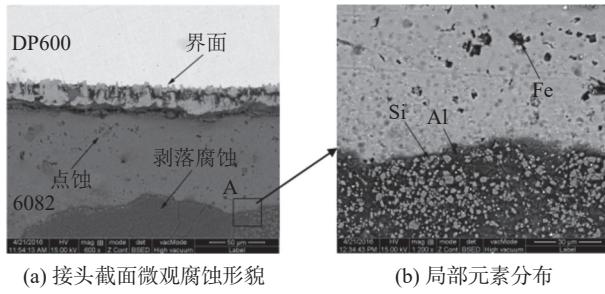


图3 6082/DP600无孔搅拌摩擦点焊接头的腐蚀形貌和局部元素分布^[18]

Fig. 3 Corrosion morphology and local element distribution of 6082/DP600 non-porous friction stir welded joints. (a) micro-corrosion morphology of the joint section; (b) local element distribution^[18]

促进腐蚀电位较低一侧母材的腐蚀,同样也进一步促进了低电位母材表面各微观区域电偶效应的发生,从而引起点蚀。同时这种作用效果也会随着基体与接头界面之间距离的增加而减弱。Seo等人^[22]在对AA6061/HT590的FSW接头截面浸泡腐蚀试验后的表征中指出,如图4所示,接头的腐蚀以点蚀的形式发生在铝合金基体上,并且伴随着表面氧化膜的大量开裂。而在钢一侧并没有形成完全的阴极保护,在铝腐蚀区域发生钝化时,其表面沉淀物与周围基体形成电偶效应,发生腐蚀形成较小的腐蚀坑。Murugan等人^[23]在对Al/304SS的FSW接头腐蚀的研究中也发现,两种母材基体上均有点蚀坑的出现,而Al一侧的腐蚀程度更严重,如图5所示。在两种母材的界面区域由于焊接搅拌作用引起大量钢碎片的分布,因此靠近界面的铝基体在与304SS以及钢碎片之间的电偶效应的共同作用下,发生严重的腐蚀溶解,形成较大且较深的腐蚀坑。由此可以看出焊接工艺影响下的基体碎片分布对于接头界面的腐蚀同样具有较大的影响。这与Mahto等人^[24]的试验结果一致,在宏观和微观角度都能够看到钢基体碎片对周围铝合金引起的严重的腐蚀,如图6所示。

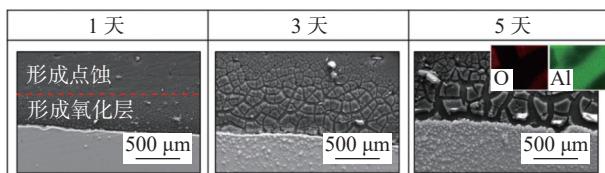


图4 接头界面腐蚀演变过程^[22]
Fig. 4 Corrosion evolution process of joint interface^[22]

相比于固相焊,熔化焊的焊接热输入更高,会使得母材达到充分的冶金结合,具有较好的连接强

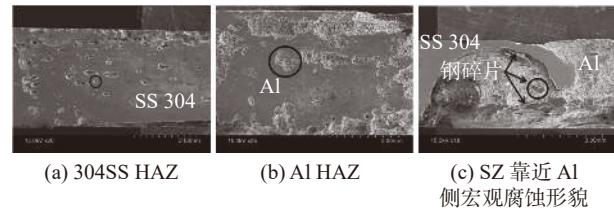


图5 Al/304SS FSW接头的腐蚀形貌^[23]
Fig. 5 Corrosion morphology of Al/304SS FSW joints.
(a) 304SS HAZ; (b) Al HAZ; (c) SZ macroscopic corrosion morphology near the Al side^[23]

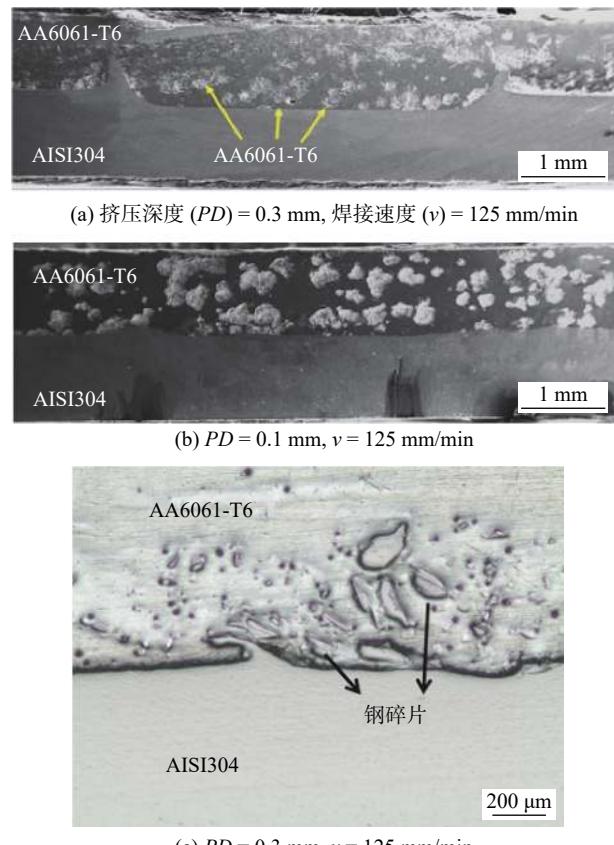


图6 接头宏观腐蚀形貌^[24]
Fig. 6 The macroscopic corrosion morphology of joints.
(a) plunge depth (PD) = 0.3 mm, welding speed (v) = 125 mm/min; (b) PD = 0.1 mm, v = 125 mm/min; (c) PD = 0.3 mm, v = 125 mm/min^[24]

度。但是也会发生一定程度的元素扩散,促进更多的析出相以及金属间化合物的形成,从而加快接头的腐蚀发生。在激光焊制备的AA6082-T6/镀锌钢接头中,焊缝区的晶界上形成了交替层状Si-Mg共晶组织,在NaCl溶液中优先溶解,并沿着晶界进行,形成晶间腐蚀,如图7所示^[25]。在Wloka等人^[26]的研究中,铝/钢激光焊接接头的焊缝与铝基体的界面上也发生了晶间腐蚀,而引起这种腐蚀类型的主要原因是,焊缝金属和铝母材基体的晶界上有腐蚀电位较低的析出相(Al-Fe、Mg-Si、富Zn相等)产生,

这些析出相与周围基体形成微电偶腐蚀，并优先发生溶解，引起晶界上的腐蚀发生，如图 8 所示。

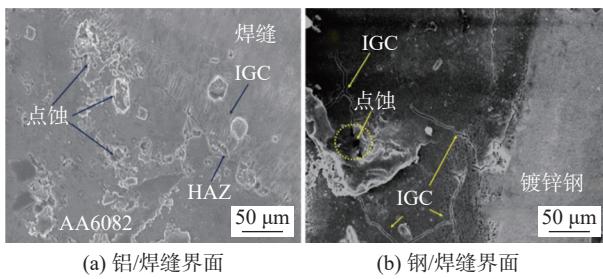


图 7 焊接接头不同区域的腐蚀形貌^[25]

Fig. 7 Corrosion morphology of different regions of the welded joint. (a) Al/WM interface; (b) steel/WM interface^[25]

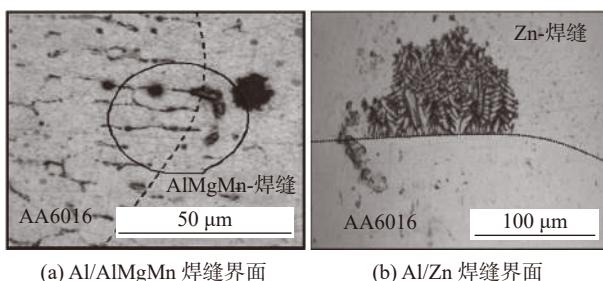


图 8 铝合金和不同焊缝金属界面腐蚀形貌^[26]

Fig. 8 Corrosion morphology of interface between aluminum alloy and different weld metals. (a) Al/AlMgMn-WM interface; (b) Al/Zn-WM interface^[26]

在熔焊方法制备的铝/钢接头的腐蚀中可以发现，腐蚀主要发生在焊缝金属和铝基体上，并且在这两个区域界面上的腐蚀更加严重，原因是在焊接过程中这些区域及其晶界上均有元素偏析和析出相的产生，引起了各个区域微电偶腐蚀的发生，造成局部腐蚀。Sravanti 等人^[27]通过 Al-5%Si 填充金属，制备 5052 铝合金/镀锌低碳钢熔钎焊接头，结果如图 9 所示，焊缝与两种母材的界面由于分布在晶界上的 Al-Si、Al-Mg-Si 相在腐蚀过程中大量脱落出现严重的晶间腐蚀。将接头试样在浓硝酸中进行 30 s、24 h 的浸泡试验，焊缝区域中 Al-Si 粒子的体积分数增加，在焊缝界面产生沉积现象^[11]。在铝/钢其他熔焊接头的腐蚀研究中发现，焊缝区、铝基体以及其界面的腐蚀均与析出相有关，这些区域的析出相种类繁多且大多沿着晶界分布，在析出相与基体以及不同的析出相之间形成的电偶效应，是引起该区域晶间腐蚀发生的主要原因^[13,28]。

综上，铝/钢异种金属焊接接头的腐蚀主要发生在铝合金一侧，焊缝区域腐蚀较弱，钢一侧的腐蚀

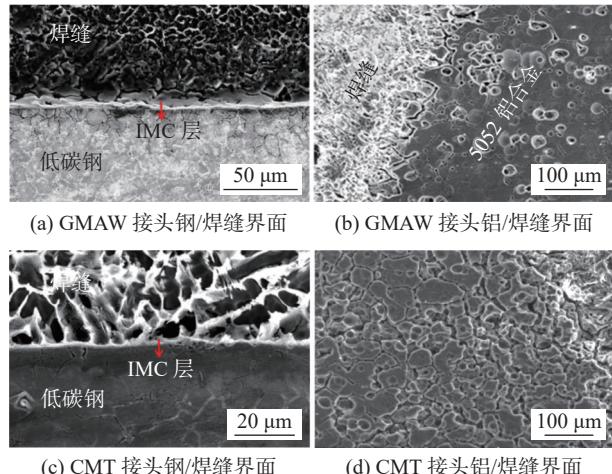


图 9 不同焊接方法接头的腐蚀形貌^[27]

Fig. 9 Corrosion morphology of joints with different welding methods. (a) steel/WM interface of GMAW-joint; (b) Al/WM interface of GMAW-joint; (c) steel/WM interface of CMT-joint; (d) Al/WM interface of CMT-joint^[27]

程度最小。并且，在固相焊接方法制备的接头中，腐蚀以点蚀的形式为主，随着点蚀的发展形成晶间腐蚀，而在此过程中，界面由于焊接工艺产生的钢碎片是引起接头腐蚀发生的主要原因。相比于固相焊接，熔化焊则由于具有高的热输入，能够促进焊缝金属与基体之间元素充分的扩散以及析出相的产生，而这也正是引起熔焊接头界面晶间腐蚀、点蚀等腐蚀形式出现的主要原因。

2 铝/钢异种金属焊接接头腐蚀行为的影响因素

2.1 焊接方法

如表 2 所示，铝和铁两种金属由于较大的理化性能差异，焊接时容易产生大量的缺陷和析出相，而这些均会影响到接头的腐蚀行为。因此，大量的研究者研究不同焊接工艺下铝/钢接头的腐蚀行为及其机理，对比了不同的焊接工艺对接头腐蚀行为的影响。研究指出，焊接工艺对接头的元素扩散及偏析产生直接的影响，从而引起接头中第二相和杂质的析出，对接头力学性能产生影响的同时也直接影响着接头整体的耐蚀性能^[29-39]。

Ma 等人^[40]在研究 304SS/2A04 铝合金摩擦焊接接头时指出，焊接热输入不同时，界面成型效果不同，从而引起接头腐蚀程度不同。对比分析后得出，在中等的焊接热输入条件下，接头界面区域连

接效果较好, 没有出现未连接缺陷, 不会造成因腐蚀溶液聚集而造成界面严重的腐蚀; 同时界面区域出现了不连续的 IMC 层, 不会引起 IMC 层与周围基体较大幅度的电偶腐蚀.

接头形式对于腐蚀的发生也扮演着重要的作用, 相比于对接接头, 搭接接头中两种母材之间存在一定宽度的间隙, 这会使得腐蚀介质聚集在其中, 从而造成两种母材内表面发生腐蚀, 引起接头失效. Geng^[16] 在 AA5052/HC420LA 钢的 MPW 搭接接头的研究中指出, 聚集在间隙中的腐蚀介质

NaCl 发生沉积进而与铝母材、钢母材形成原电池, 引起腐蚀敏感性较高的 Al 合金内表面发生腐蚀. 同样 Pan 等人^[17] 通过对比 RSW 和 SPR 制备的 AA6022-T4/HSLA 340 接头的腐蚀时也指出接头缝隙中的腐蚀更加严重. 但是, 两个作者都发现, 随着腐蚀的持续进行, 缝隙内部腐蚀产物的生成阻碍腐蚀介质的侵入, 抑制缝隙内侧母材的进一步腐蚀. 同时在较小的缝隙中, 腐蚀反应产生的 OH⁻ 浓度较高, 排斥 Cl⁻, 引起铝母材内表面钝化, 也起到抑制腐蚀持续进行的效果.

表 2 铝和铁的热物理参数^[39]
Table 2 Thermal physical parameters of aluminum and iron^[39]

| 金属 | 密度 $D/(g\cdot cm^{-3})$ | 熔点 T/K | 比热容 $C/(J\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1})$ | 导热率 $\lambda/(W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1})$ | 弹性模量 E/GPa | 电阻系数 $\rho/(10^{-8}\Omega\cdot m)$ |
|-------|----------------------------|-------------|---|--|-----------------|---------------------------------------|
| 铝(Al) | 2.7 | 933 | 900.5 | 220 | 71 | 2.62 |
| 铁(Fe) | 7.87 | 2800 | 481.5 | 66.7 | 210 | 13.1 |

Narsimhachary 等人^[25] 采用激光焊接制备 AA6082/镀锌钢接头, 对比不同焊接工艺发现, 焊接功率越高, 焊接接头成型越好, 但是界面 IMC 较厚, 易与周围的基体产生较强的电偶效应, 引起严重的腐蚀. 在 MIG 焊制备的接头中, 由于焊接热输入升高, Al 元素扩散更加充分, 界面容易形成较厚的 Al-Fe 的 IMC, 在腐蚀过程中优先发生溶解, 降低接头的耐蚀性^[36]. Sravanthi 等人^[27] 对比分析了 GMAW 和 CMT 两种方法, 以及不同 CMT 参数下制备的铝/钢接头腐蚀情况. 结果指出, 接头中界面区域是腐蚀敏感区域, 并且随着焊接热输入增加, IMC 层越厚, 界面腐蚀敏感性增加, 接头整体的耐蚀性减弱. 同样在 Shi 等人^[41] 采用脉冲旁路耦合电弧焊技术的复合焊接方法制备的 1060 铝/镀锌钢接头的腐蚀研究中, 通过改变旁路焊接电流来改变焊接热输入, 也得到了相同的结论.

综上, 焊接工艺对于接头腐蚀行为的影响主要归因于焊接热输入的差异, 在相对较低的热输入下, 接头的缺陷明显减少, 整个接头的腐蚀速率较慢, 耐蚀性能得到了显著的提升. 然而, 在限制焊接工艺的情况下, 接头形式则影响接头的腐蚀情况, 主要归因于接头形式造成腐蚀介质富集, 造成腐蚀的加剧.

2.2 微观组织

微观组织是影响材料使役性能的一个重要方面, 主要体现在晶粒尺寸、晶界特征分布、偏析、夹

杂以及相的组成和分布等方面. 而微观组织通常伴随着焊接方式以及热输入的变化而变化, 因此金属的腐蚀行为也在不同程度的受其影响^[42]. 例如镁合金的耐蚀行为更多的取决于其自身的微观组织 (α -Mg 和 β -phases), 其微观组织则随着加工方式而变化, 包括热变形、热输入等, 从而表现出不同的耐蚀性能^[43]. 目前, 相比于合金成分, 微观组织对腐蚀行为影响的研究较少, 并且在焊接接头尤其是异种金属接头中, 微观组织的变化对接头整体耐蚀性能的影响是非常需要关注和探讨的问题.

Anaman 等人^[44] 在 AA5052-H32/DP1200 的 FSW 接头中发现, 如图 10 所示, 在接头搅拌区由于机械作用分为三层, 其中最下层的腐蚀速率最快, 主要是因为焊接角度的原因使得最下层由变形的 DP1200 钢组成, 并且在焊接热输入的作用下引起钢基体中的铁素体发生马氏体转变, 以及奥氏体相的不连续动态再结晶. 大量的马氏体相与周围铁素体之间形成微电偶效应引起作为阳极的铁素体发生腐蚀; 同时细小的晶粒, 增加了晶界面积, 从而增加了马氏体与铁素体接触面积, 促进了电偶效应形成, 加快了腐蚀. Li 等人^[19] 在 RFSSW 制备 ST Al/T06Z 镀锌钢接头中发现, 接头搅拌区的组织是 Al 基体与富 Zn 层交替的层状结构, 分布在晶界的 Zn、Mg 元素腐蚀电位低, 使得在腐蚀过程中晶界优先发生溶解, 形成晶间腐蚀, 导致搅拌区的耐蚀性降低, 并且腐蚀产物的形成及脱落的过程中还会

带动基体的表层金属剥离,形成剥落腐蚀。在 FSW 焊接工艺的影响下,焊核区会分布有少量的钢碎片,引起焊核区组织不均匀以及表面钝化膜的不稳定,降低焊核区以及接头整体的耐蚀性^[45]。



图 10 焊接接头截面的宏观组织^[44]
Fig. 10 Macrostructure of welded joint section^[44]

2.3 晶粒尺寸

晶粒细化改变金属表面反应活性从而影响腐蚀敏感性,关于晶粒尺寸对腐蚀行为影响的研究证明了这一点^[46-49]。但是,具体的晶粒尺寸与腐蚀行为之间的关系及影响机理,在大量的研究中也得出了不同的结论。

有相关研究指出晶粒细化降低材料的腐蚀敏感性。晶粒细化,晶界密度增加,导致钝化膜的形成速率和粘附性提高,例如 Ralston 等人^[50]认为晶粒尺寸细小的镁合金表面具有更多的氧化膜,可以保护基体免受腐蚀。Zeng 等人^[51]也指出,Mg-Li-Ca 合金由于晶粒尺寸较小,耐蚀性能较好,并且腐蚀形式由局部的点蚀转变为整体腐蚀。关于铝/钢焊接接头, Ma 等人^[20]在其腐蚀研究中发现,在晶粒尺寸较小的接头表面形成了致密且厚的钝化膜和腐蚀产物层,同时晶间腐蚀的速率也会因晶粒尺寸的减小而减小。总结现有的研究发现,对轻质金属镁、铝、钛等合金体系,晶粒尺寸的影响规律较为一致,即随着晶粒尺寸减小耐蚀性显著提高^[50]。

相反,也有研究表明晶粒细化会增加材料的腐蚀敏感性,主要归结为晶粒细化在材料内引入了大量的缺陷,增加反应活性位点,不利于表面钝化膜的稳定性。例如,在铝/钢的 FSW 接头的腐蚀研究中,接头晶粒尺寸与焊接速度密切相关,焊接速度越大,晶粒越细小,因此晶界面积越大,表面活性越大,腐蚀速率则更大^[23]。在 Anaman^[44]的研究中也得出了同样的结论,此外,该作者还强调尺寸细小的晶粒会增加晶界面积,增大不同相之间的接触面积,促进电偶效应的形成,加快了腐蚀速率。Mahto 等人^[24]在此基础上还指出,如图 11 所示,焊接热输入和压力的变化同样影响析出相的分布,而析出相与周围的基体之间形成微电偶效应,增加基体的腐蚀敏感性,降低接头的耐蚀性。奥氏体钢中

的李晶组织抑制碳化物的析出,能够减小钢一侧的腐蚀敏感性。与基材相比,焊接区域内晶粒的动态再结晶和沉淀物的部分溶解,提高了焊接样品的耐蚀性。

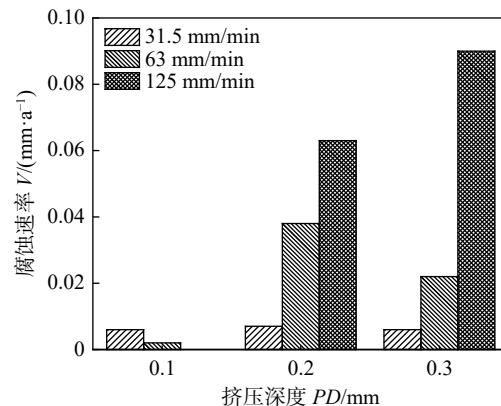


图 11 腐蚀速率,焊接速度及挤压深度的关系^[23]
Fig. 11 The relationship between corrosion rate, welding speed and plunge depth^[23]

2.4 金属间化合物

在焊接接头中,由于焊接工艺以及母材的影响,接头中经常出现各种各样的第二相。关于第二相通常是指不同于基体相的所有其他相,具有不同于基体相的成分和晶体结构。焊接接头中的第二相主要包括金属间化合物相(IMC)、夹杂物及其他析出相等,这些相直接影响着接头的腐蚀行为^[52-54]。例如不锈钢中的 MnS 夹杂增加了材料的点蚀敏感性^[55]; IMC 大多属于硬脆相,一般可提高材料的机械强度和耐冲刷腐蚀性能,如高强铜镍合金中的 Ni₃Al、镍铝青铜中的 K 相^[56],但另一方面也增加材料腐蚀的敏感性。这些第二相的存在造成接头组织较为复杂,不同相之间因腐蚀电位差异很容易形成微电偶效应,容易引起局部腐蚀的发生。

在铝/钢异种金属焊接接头中,其界面处容易形成一些脆硬的 Fe-Al IMC^[28]。这些 IMC 通常出现在两种母材之间以及母材与焊缝金属之间,由于 IMC 和周围的基体之间存在腐蚀电位差,从而容易在这些界面区域引起的微观的电偶腐蚀。然而,IMC 由于焊接工艺的不同,呈现出不同的形貌和尺寸,对于接头整体的腐蚀行为的影响也有所不同,许多研究者从这一方面出发,从不同的角度详细地讨论了 IMC 对 Al-Steel 接头腐蚀行为的影响。表 3 总结了不同焊接接头 IMC 的种类,从中能够清楚的看到固相焊制备的接头中,IMC 的种类较少,而在熔焊方法制备的接头中,由于其较高的焊接热输

表3 铝/钢焊接接头界面IMC
Table 3 Summary of IMC at the interface of aluminum/steel welded joints

| 母材 | 焊接方法 | 填充金属 | IMC种类 | 参考文献 |
|------------------------------|------------|--|--|------|
| Novelis AC 170 PX/ST06 Z 镀锌钢 | GTAW | Al-Si (ER4047) | Fe ₄ Al ₃ 、Fe ₂ Al ₅ 、Al-Si-Mn-Fe、Al ₃ Fe ₂ Si ₃ 、Al ₃ Fe ₂ Si | [15] |
| 1060/镀锌钢(Q235) | 脉冲DE-GMA钎焊 | Al-Mn (ER5356) Al-Si (ER4043) | Fe ₂ Al ₅ 、FeAl ₃ | [16] |
| AA6082/镀锌钢 | 激光焊 | AA4047 | Al ₂ FeSi、Al ₃ FeSi、Fe ₂ Al ₅ | [17] |
| AA6016/DX56D + Z 140 MB | 激光钎焊 | AlMg ₆ Mn、ZnAl ₂ | Zn-Al、Fe ₂ Al ₅ | [18] |
| 5052/镀锌钢(低碳) | GMAW、CMT | Al-5%Si | Al ₃ FeSi ₂ 、Al ₅ FeSi、Fe ₃ Al _{0.7} Si _{0.3} 、Fe ₂ Al ₅ 、(Fe ₃ Al _{0.5} Si _{0.5})、Al _{0.85} Si _{0.15} | [19] |
| 19000/镀锌钢(低碳) | CMT | 4047 Al | Al ₃ FeSi ₂ 、Al ₅ FeSi、Fe ₃ Al _{0.7} Si _{0.3} 、Fe ₂ Al ₅ 、Fe ₃ Al _{0.5} Si _{0.5} 、Al _{0.85} Si _{0.15} | [20] |
| 5052-H32/镀锌钢 | MIG、CMT | Al-5% Si (BA4043 Al) | Al _{0.5} Fe ₃ Si _{0.5} 、βAl-Mg、Mg ₂ Si、(δAl ₃ FeSi ₃ 、Al _{0.5} Fe _{0.5}) | [22] |
| 5052-H32/镀锌钢 | GMAW | Al-Si (ER4043) | Fe ₂ Al ₅ 、Fe ₄ Al ₁₃ 、Al-Fe-Si | [23] |
| 5052-H32/DP1200 | FSW | — | Fe ₂ Al ₃ 、FeAl ₂ 、FeAl | [21] |
| AA6061-T6/AISI304 | FSW | — | Fe ₂ Al ₅ 、AlCrFe ₂ | [24] |
| AA6061-T6/Q235 | FSW | — | Fe ₃ Al、FeAl、Fe ₂ Al ₅ | [25] |

入以及填充金属的加入,母材与焊缝金属中的元素能够充分的扩散,形成了种类较多的IMC.

IMC的种类及形貌的不同,使得焊接接头界面腐蚀情况也有明显的差异.在Ma等人^[28]的研究中,焊缝金属与钢界面不同的IMC与焊缝金属中 α -Al基体之间的电偶腐蚀程度不同.结果如图12所示,层状Fe₄Al₁₃IMC与钢基体相连,相比于远离钢基体的棒状Fe₄Al₁₃,与 α -Al形成的阳极和阴极面积比较大,因此形成较强的耦合电流,引起较快的腐蚀.相比于Al合金,WM与镀锌钢的界面容易产生Fe-Al IMC,并以板条状和针状向焊缝中心延伸,导致低电位的焊缝金属发生严重的腐蚀^[26].不同焊接热循环下形成的IMC形貌也随之变化.然而,随着IMC的厚度变化,电偶腐蚀溶解速率不同,IMC越厚,与周围基体形成的阴极和阳极的面积比越大,腐蚀速率越大^[25]. Shi等人^[41]对1060铝/镀锌钢接头不同微观区域进行分析发现,Al-Mg作为填充金属时,在界面区域的钢一侧产生舌状的Fe₂Al₅和焊缝侧锯齿状的FeAl₃IMC,在电偶效应的作用下,腐蚀优先发生在IMC两侧,且向钢一侧扩展,形成均匀腐蚀,焊缝侧腐蚀较弱.Al-Si作为填充金属时,在界面处的钢一侧形成板状的Fe₂Al₅相以及焊缝侧针状的FeAl₃相,发生均匀腐蚀.由此可以看出,IMC的形貌及其分布引起不同程度的电偶效应,而这些电偶效应的不同则是通过

阴极阳极面积之比、阴极和阳极之间的距离以及IMC自身所含元素与周围基体元素之间的腐蚀电位差等原因所造成的.

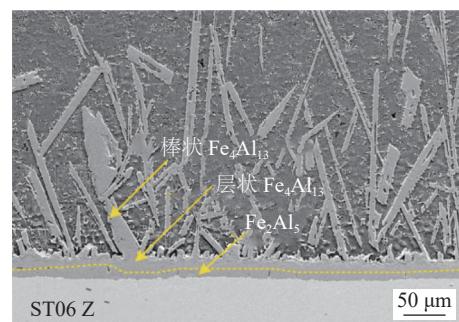


图12 焊缝金属与钢界面反应层的腐蚀形貌^[28]

Fig. 12 Corrosion morphology of interfacial reaction layer between weld metal and steel^[28]

Sravanthi等人^[27]在采用GMAW和CMT两种方法得到的接头中发现,钢/焊缝金属界面均形成了Al-Fe-Si的IMC.如图13所示,随着腐蚀进行,接头界面处的IMC出现裂纹并优先溶解.IMC越厚,在腐蚀的作用下,产生的裂纹越多,造成IMC层发生严重的破碎.并且在后续的研究中指出,这些IMC在腐蚀过程中发生破裂和溶解,是由氧化作用以及与周围基体电偶效应共同引起的^[11].而在Al合金/焊缝金属界面中,由于焊接过程中元素的扩散,在Al基体靠近界面区域的晶界上有大量的 β -AlMg相析出,如图14所示,这些析出

相与周围的 Al 基体形成电偶效应, 优先发生溶解, 形成晶间腐蚀^[57].

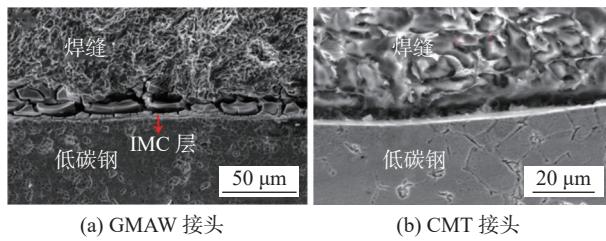


图 13 接头腐蚀 24 h 的微观组织^[27]

Fig. 13 The microstructure of the joint corroded for 24 h. (a) GMAW joint; (b) CMT joint^[27]

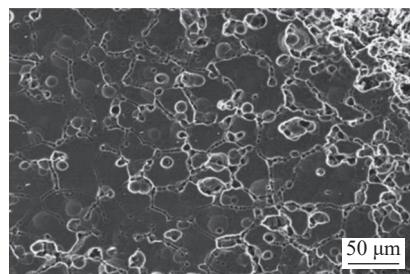
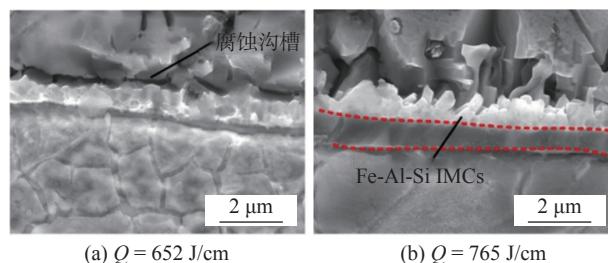


图 14 Al 基体晶间腐蚀形貌^[57]

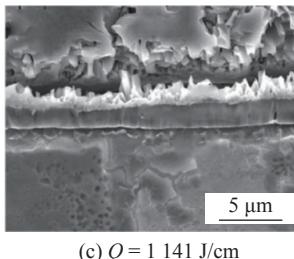
Fig. 14 Intergranular corrosion morphology of Al matrix^[57]

不同种类 IMC 的腐蚀敏感性是不同的, 在焊接过程中, 由于元素的扩散程度、化合物的形成速率的差异, 在接头界面区域形成了不同种类的 IMC 层, 引起接头界面区腐蚀顺序不同, 从而造成不同的腐蚀程度. Anaman^[44] 在铝/钢的 FSW 接头的腐蚀研究中发现, 在搅拌区 (SZ) 的上表面主要由软化的铝基体构成, 而在其下方分布有大量的 IMC 和钢碎片, 与周围 Al 基体形成微电偶效应, 造成上表面相对与 Al 母材表现出更差的耐蚀性. 在 Mo^[21] 的研究中, 接头的界面区域由于元素的扩散, 出现了 FeAl、Fe₃Al 和 Fe₂Al₅ 三种 IMC 层. 不同的 IMC, 腐蚀敏感性不同, 腐蚀敏感性较高的 Fe₂Al₅ 优先发生溶解, 并且伴随着与基体电偶效应的作用, 造成接头整体的连接强度下降. 界面上这些微米级的 IMC 层通常可以分为富 Al 和富 Fe 两种类型, 其中富 Fe 的 IMC 以 FeAl 和 Fe₃Al 为主, 具有相对较高的耐蚀性^[24]. 如图 15 所示, 在 AA5052-H32/镀锌钢的 GMAW 接头中, 热输入较低时, 钢/焊缝金属界面形成了 Fe₂Al₅ 和 Fe₄Al₁₃ 为主的二元 IMC, 经过腐蚀试验在 IMC 与 WM 之间形成了腐蚀沟槽, 并且在界面周围产生了大量的点蚀坑. 在较高的热输入下, 在 Al-Fe 二元 IMC 与 WM 之间, 即 IMC 层的外层由于大量 Si 元素存在形成了 Al-Fe-Si 的三元 IMC, 并且相比于 IMC 内

层, 外层腐蚀后的 O 元素的含量较高, 说明其腐蚀更加严重, 形成了更大的腐蚀沟槽, 如图 16 所示^[13].



(a) $Q = 652 \text{ J/cm}$ (b) $Q = 765 \text{ J/cm}$



(c) $Q = 1141 \text{ J/cm}$

图 15 不同热输入下的界面腐蚀形貌^[13]

Fig. 15 Interface corrosion morphology with different heat input. (a) $Q = 652 \text{ J/cm}$; (b) $Q = 765 \text{ J/cm}$; (c) $Q = 1141 \text{ J/cm}$ ^[13]

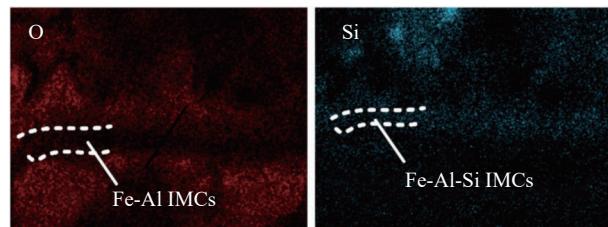


图 16 $Q=765 \text{ J/cm}$ 界面腐蚀后氧, 硅元素分布^[13]

Fig. 16 The distribution of O and Si elements^[13]

通过以上学者的研究, 可以看到, 接头界面由于 IMC 的存在, 成为接头耐腐蚀性能最差的区域. 其中 IMC 的形貌、分布及其种类的差异, 均会引起界面不同程度的腐蚀, 而造成这种局部腐蚀的根本原因则是 IMC 与周围基体之间的电偶效应所致.

2.5 腐蚀环境

金属材料的腐蚀行为是导致金属材料发生失效的形式之一, 而金属材料的服役环境是决定其腐蚀性能的另一个重要因素. 金属材料的服役环境复杂多样, 服役环境的变化导致腐蚀性能和腐蚀行为具有明显的差异, 典型的腐蚀环境有海洋环境、土壤环境和含有不同污染物的大气环境, 环境中包含的酸、碱、盐等介质是造成金属腐蚀的主要因素^[58-60]. 铝/钢异种金属焊接接头由于结合了两种金属的优异性能, 应用范围广, 服役的环境类型多且较为复杂, 服役环境对接头的腐蚀损坏程度不同,

因此, 对比讨论不同腐蚀环境对铝/钢焊接接头的影响, 能够更好的预防焊接接头腐蚀环境下潜在的危害.

Wang^[15] 在对 AA3033/HC340LA MPW 搭接接头的研究中发现, 搭接接头中两个母材之间存在间隙, 作为腐蚀介质的 NaCl 盐雾容易从搭接区的间隙进入, 在间隙中聚集形成 NaCl 溶液. 铝和钢这两种母材, 通过 Cl⁻ 和 Na⁺ 在氯化钠溶液中的导电作用, 形成了一个原电池, 从而引起缝隙腐蚀. Cl⁻ 吸附在铝表面氧化膜上, 破坏氧化膜, Al 基体作为阳极, 产生 Al³⁺, 形成点蚀坑, 而钢作为阴极得到保护. 除了在缝隙内形成原电池外, 接头缝隙内氧的含量较低, 会发生析氢反应和氧的还原反应, 因此产生大量的 OH⁻, 增大缝隙内局部 pH 值, 排斥其他阴离子 (Cl⁻), 低的氧含量和 Cl⁻ 浓度以及较高的 pH 值能够降低搭接区域的腐蚀速率^[17].

在酸性或者碱性腐蚀环境中, 铝/钢接头的腐蚀破坏是非常大的. Sravanthi 等人^[61] 将 6061-T6 铝/镀锌钢接头试样浸泡在 80 °C 的 NaOH 溶液中, Al 和 NaOH 溶液发生反应, 生成的氢气导致表面氧化层大量破坏和脱落, 而钢的表面则发生部分的溶解. 当接头浸泡在 HNO₃ 溶液中时, 界面 IMC 层优先发生腐蚀, 同时, 靠近焊缝的铝表面晶粒间的 Al-Mg 析出相也发生溶解, 形成晶间腐蚀. 苏永超^[62] 在对比模拟海水和酸性潮湿空气的腐蚀环境时, Cl⁻ 由于较小的尺寸能够穿透铝合金焊缝表面的氧化膜, 对焊接试样破坏作用较 SO₄²⁻ 离子更加强烈, 腐蚀更加严重, 结果如图 17 所示.

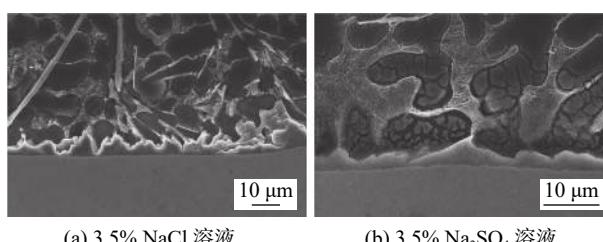


图 17 不同腐蚀环境接头界面区域的腐蚀情况^[62]
Fig. 17 Corrosion morphology of joint interface region at different corrosion environments. (a) 3.5 wt.% NaCl solution; (b) 3.5 wt.% Na₂SO₄ solution^[62]

Takehisa^[63] 在空气、蒸馏水以及盐水中通过浸泡腐蚀对比分析, 如图 18 所示, 接头在空气中静置 84 天后没有发生变化, 而在蒸馏水和盐水环境中, 7 天以后各母材表面均有腐蚀产物的生成, 随着时间的延长, 蒸馏水中的试样界面区域产生了红色的腐蚀产物, 其中盐水中的 Al 一侧出现了明显的点

蚀现象. 在 NaCl 溶液和大气环境下的对比腐蚀后, 浸泡腐蚀后的接头相比于大气环境暴露下的接头抗拉强度明显降低, 这是因为在浸泡腐蚀实验中, 接头试样与腐蚀介质实际接触的更加充分, 腐蚀破坏更加严重所致^[64]. 王健^[65] 采用 304/6061 激光高熵填粉焊接制备的接头, 分别在 3.5 wt.% NaCl 和 0.5 mol/L HCl 溶液进行腐蚀实验, 相对于在 3.5 wt.% NaCl 溶液环境, 0.5 mol/L HCl 溶液下焊接接头发生了活化溶解的行为, 因而没有发现明显的钝化区, 主要的原因是因为 Cl⁻ 的穿透性较强, 可以吸附在钝化膜的表面使其成为最薄弱的区域, 而且溶液中的 H⁺ 同样参与了焊缝的阳极反应和钝化膜的溶解过程, 所以加速了腐蚀的进行.

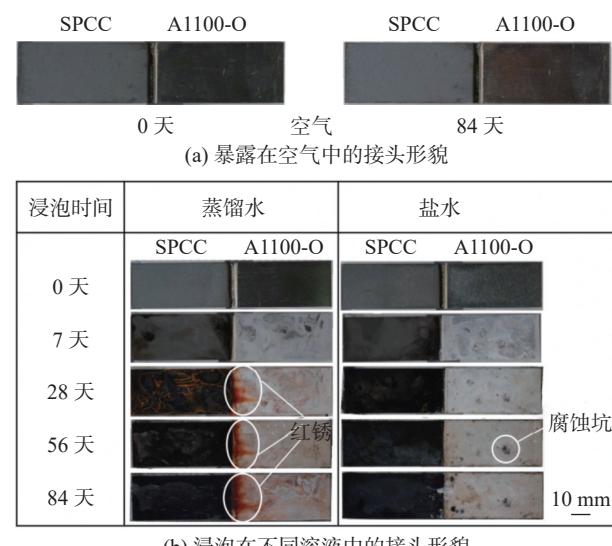


图 18 不同环境接头腐蚀形貌的变化^[63]
Fig. 18 The change of corrosion morphology of joints in different environments. (a) morphology of joints in air; (b) morphology of joints in different solutions^[63]

基于以上文献所述可以得出: 相比于中性的腐蚀环境, 酸性或碱性的腐蚀环境对铝/钢接头的破坏更加严重; 腐蚀介质中的离子尺寸对于焊接接头表面的渗透不同, Cl⁻ 的尺寸较小, 对于接头的腐蚀起着主导作用; 腐蚀介质形式通常影响焊接接头的腐蚀形式, 例如在腐蚀性气氛中, 焊接接头各区域的腐蚀介质富集程度不同, 引起接头局部区域腐蚀程度不同, 造成接头失效.

3 结束语

(1) 铝/钢异种金属焊接接头的腐蚀主要发生在铝合金和焊缝区域, 钢母材腐蚀程度最小. 腐蚀形

式常见有点蚀、晶间腐蚀和剥落腐蚀，其中点蚀为主要形式。引起这种局部腐蚀的主要原因是接头微观组织的不均匀。

(2) 焊接工艺包括接头形式、焊接参数以及所采用的填充金属等，这些影响接头的形成过程，从而改变接头的腐蚀形式及腐蚀程度。因此，控制焊接参数并对焊缝金属进行调控，会对改善铝/钢接头的耐蚀性起到显著的效果。

(3) 微观组织和析出相的分布不均匀，以及晶粒尺寸的变化都会引起接头各个区域微电偶效应的产生，导致接头耐蚀性下降，加速接头的腐蚀失效。因此，改变微观组织结构，控制析出相的分布以及晶粒尺寸，可以有效的改善接头的耐蚀性能。

(4) IMC 通常会由于焊接过程中元素的扩散，出现在接头的各个界面区域，由于 IMC 与基体之间电偶效应的产生，导致界面区域具有高的腐蚀敏感性，优先发生腐蚀溶解。因此，通过改变填充金属、焊接参数等焊接工艺，对界面 IMC 进行调控，在保证接头力学性能的同时，可以提升接头整体的耐蚀性能。

(5) 由于铝/钢接头的服役环境复杂多样，不同的腐蚀环境对接头腐蚀行为的影响不同，从而造成不同的腐蚀程度。因此，在提升接头耐蚀性的同时要注重环境因素的影响，针对不同的腐蚀环境，通过焊接工艺的改变以及焊材的选择，提升接头的耐蚀性能。

参考文献

- [1] 钟奇, 施毅, 刘博. 铝合金在汽车轻量化中的应用 [J]. 新材料产业, 2015(2): 23 – 27.
Zhong Qi, Shi Yi, Liu Bo. Application of Aluminum Alloy in Automotive Lightweight[J]. New Materials Industry, 2015(2): 23 – 27.
- [2] 刘荣, 汪洋, 李平仓等. 爆炸焊接小直径铝/不锈钢复合管的研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(S4): 645 – 648.
Liu Rong, Wang Yang, Li Pingcang, et al. Explosive welding of small diameter aluminum/stainless steel clad pipes[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37(S4): 645 – 648.
- [3] Qiu R, Satonaka S, Iwamoto C. Effect of interfacial reaction layer continuity on the tensile strength of resistance spot welded joints between aluminum alloy and steels[J]. Materials & Design, 2009, 30(9): 3686 – 3689.
- [4] Cao R, Yu G, Chen J H, et al. Cold metal transfer joining aluminum alloys-to-galvanized mild steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(10): 1753 – 1763.
- [5] Qin G, Ao Z, Chen Y, et al. Formability behavior of Al/steel MIG arc brazed-fusion welded joint[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 273: 116255.
- [6] Li P, Chen S, Dong H, et al. Interfacial microstructure and mechanical properties of dissimilar aluminum/steel joint fabricated via refilled friction stir spot welding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 49: 385 – 396.
- [7] Uzun H, Dalle Donne C, Argagnotto A, et al. Friction stir welding of dissimilar Al 6013-T4 to X5CrNi18-10 stainless steel[J]. Materials & Design, 2005, 26(1): 41 – 46.
- [8] Tanaka T, Morishige T, Hirata T. Comprehensive analysis of joint strength for dissimilar friction stir welds of mild steel to aluminum alloys[J]. Scripta Materialia, 2009, 61(7): 756 – 759.
- [9] 何鹏, 冯吉才, 钱乙余, 等. 接触反应法解决铝/不锈钢钎焊的缺陷及脆性 [J]. 材料科学与工艺, 2005(1): 82 – 85.
He Peng, Feng Jicai, Qian Yiyu, et al. Contact reaction method to solve the defects and brittleness of aluminum/stainless steel brazing[J]. Material science and technology, 2005(1): 82 – 85.
- [10] 姜德富. 铝/钢表面同时添加粉末激光焊接头组织性能及机理研究 [D]. 湖南: 湖南大学, 2017.
Jiang Defu. Study on the microstructure, properties and mechanism of laser welded joints with powder addition on the surface of aluminum/steel[D]. HuNan: HuNan University, 2017.
- [11] Sravanthi S S, Acharyya S G, Prabhakar K V P, et al. Effect of varying weld speed on corrosion resistance and mechanical behavior of Aluminium - steel welds fabricated by cold metal transfer technique[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2019, 34(14): 1627 – 1637.
- [12] Gnedenkov S A, Sinebryukhov L S, Mashtalyar V D, et al. Effect of microstructure on the corrosion resistance of TIG welded 1579 alloy[J]. Materials, 2019, 12(16): 2615 – 2615.
- [13] Ma H, Qin G, Geng P, et al. Effect of intermetallic compounds on the mechanical property and corrosion behaviour of aluminium alloy/steel hybrid fusion-brazed welded structure[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 75: 170 – 180.
- [14] Olatunji P, Abolusoro E T A. Wear and corrosion behaviour of friction stir welded aluminium alloys- an overview[J]. International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development, 2019, 9(3): 967 – 982.
- [15] Wang S, Luo K, Sun T, et al. Corrosion behavior and failure mechanism of electromagnetic pulse welded joints between galvanized steel and aluminum alloy sheets[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 64: 937 – 947.
- [16] Geng H, Cui J, Li G, et al. Mechanical degradation of magnetic pulse welded Al-Fe joint in neutral salt environment[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 15: 2365 – 2378.
- [17] Pan B, Sun H, Shang S L, et al. Corrosion behavior in aluminum/galvanized steel resistance spot welds and self-piercing riveting joints in salt spray environment[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 75: 170 – 180.

- turing Processes, 2021, 70: 608 – 620.
- [18] Zhang Z K, Yu Y, Zhang J F, et al. Corrosion behavior of key-hole-free friction stir spot welded joints of dissimilar 6082 aluminum alloy and DP600 galvanized steel in 3.5% NaCl solution[J]. Metals, 2017, 7(9): 338 – 338.
- [19] Li P, Wang Y, Wang S, et al. Corrosion behavior of refilled friction stir spot welded joint between aluminum alloy and galvanized steel[J]. Materials Research Express, 2018, 5(9): 96524 – 96524.
- [20] Ma Y, Dong H, Wang Y, et al. Effect of Zn coating on microstructure and corrosion behavior of dissimilar joints between aluminum alloy and steel by refilled friction stir spot welding[J]. Journal of Applied Electrochemistry, 2021, 52(1): 85 – 102.
- [21] Mo Shuxian, Dong Shaokang, Zhu Hao, et al. Corrosion behavior of aluminum/steel dissimilar metals friction stir welding joints[J]. CHINA WELDING, 2021, 30(3): 20 – 30.
- [22] Seo B, Song K H, Park K. Corrosion properties of dissimilar friction stir welded 6061 aluminum and HT590 steel[J]. Metals and Materials International, 2018, 24(6): 1232 – 1240.
- [23] Murugan B, Thirunavukarasu G, Kundu S, et al. Influence of tool traverse speed on structure, mechanical properties, fracture behavior, and weld corrosion of friction stir welded joints of aluminum and stainless steel[J]. Advanced Engineering Materials, 2019, 21(2): 1800869.
- [24] Mahto R P, Anishetty S, Sarkar A, et al. Interfacial microstructural and corrosion characterizations of friction stir welded AA6061-T6 and AISI304 materials[J]. Metals and Materials International, 2018, 25(3): 752 – 767.
- [25] Narsimhachary D, Rai P K, Shariff S M, et al. Corrosion behavior of laser-brazed surface made by joining of AA6082 and galvanized steel[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2019, 28(4): 2115 – 2127.
- [26] Wloka J, Laukant H, Glatzel U, et al. Corrosion properties of laser beam joints of aluminium with zinc-coated steel[J]. Corrosion Science, 2007, 49(11): 4243 – 4258.
- [27] Sravanti S S, Acharyya S G, Chapala P. Effect of GMAW-brazing and cold metal transfer welding techniques on the corrosion behaviour of aluminium-steel lap joints[J]. Materials Today: Proceedings, 2019, 18(pt 7): 2708 – 2716.
- [28] Ma Y, Dong H, Li P, et al. A novel corrosion transformation process in aluminum alloy/galvanized steel welded joint[J]. Corrosion Science, 2022, 194: 109936.
- [29] Wan L, Huang Y. Friction stir welding of dissimilar aluminum alloys and steels: a review[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 99(5): 1781 – 1811.
- [30] Wang L, Li H, Wu D, et al. Study on microstructures and fatigue behavior of dissimilar Al/steel resistance spot welded joint[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2022, 45(7): 2047 – 2057.
- [31] Zhao Y, Long Y, Li Z. Research progress of transition layer and filler wire for laser welding of steel and aluminum dissimilar metals[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 119(7-8): 4149 – 4158.
- [32] Zhou D, Xu S, Peng L, et al. Laser lap welding quality of steel/aluminum dissimilar metal joint and its electronic simulations[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 86(5-8): 2231 – 2242.
- [33] Wallerstein D, Solla E L, Lusquiños F, et al. Advanced characterization of intermetallic compounds in dissimilar aluminum-steel joints obtained by laser welding-brazing with Al Si filler metals[J]. Materials Characterization, 2021, 179: 111345.
- [34] Furukawa K. New CMT arc welding process—welding of steel to aluminium dissimilar metals and welding of super-thin aluminium sheets[J]. Welding International, 2006, 20(6): 440 – 445.
- [35] Sun Y F, Fuji H, Takaki N, et al. Microstructure and mechanical properties of dissimilar Al alloy/steel joints prepared by a flat spot friction stir welding technique[J]. Materials & Design, 2013, 47: 350 – 357.
- [36] Katayama S. Laser welding of aluminium alloys and dissimilar metals[J]. Welding International, 2004, 18(8): 618 – 625.
- [37] Movahedi M, Kokabi A H, Reihani S M S, et al. Effect of tool travel and rotation speeds on weld zone defects and joint strength of aluminium steel lap joints made by friction stir welding[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2012, 17(2): 162 – 167.
- [38] Sierra G, Peyre P, Beaume F D, et al. Steel to aluminium braze welding by laser process with Al–12Si filler wire[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2008, 13(5): 430 – 437.
- [39] 冯宝强. 铝/钢异种金属激光-电弧复合焊接及胶焊研究 [D]. 大连理工大学, 2018.
- Feng Baoqiang. Research on laser-arc hybrid welding and adhesive welding of aluminum/steel dissimilar metals[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.
- [40] Ma H, Qin G, Geng P, et al. Microstructural characterisation and corrosion behaviour of aluminium alloy/steel hybrid structure produced by friction welding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 61: 349 – 356.
- [41] Shi Y, Li J, Zhang G, et al. Corrosion behavior of aluminum-steel weld-brazing joint[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2016, 25(5): 1916 – 1923.
- [42] Chen L, Zeng Q, Li J, et al. Effect of microstructure on corrosion behavior of a Zr–Sn–Nb–Fe–Cu–O alloy[J]. Materials & Design, 2016, 92: 888 – 896.
- [43] Dong J H, Tan L L, Ren Y B, et al. Effect of microstructure on corrosion behavior of Mg–Sr Alloy in Hank's Solution[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2018, 32(3): 305 – 320.
- [44] Anaman S Y, Cho H-H, Das H, et al. Microstructure and mechanical/electrochemical properties of friction stir butt welded joint of dissimilar aluminum and steel alloys[J]. Materials Characterization, 2019, 154: 67 – 79.

- [45] Benfer S, Thomä M, Wagner G, et al. Investigations on corrosion properties of ultrasound-enhanced friction-stir-welded aluminum/dual-phase steel joints[J]. *steel research international*, 2021, 92(12): 2100249.
- [46] Gollapudi S. Grain size distribution effects on the corrosion behaviour of materials[J]. *Corrosion Science*, 2012, 62: 90 – 94.
- [47] Huang L, Wang K, Wang W, et al. Effects of grain size and texture on stress corrosion cracking of friction stir processed AZ80 magnesium alloy[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2018, 92: 392 – 404.
- [48] Wang P J, Ma LW, Cheng X Q, et al. Influence of grain refinement on the corrosion behavior of metallic materials: A review[J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2021, 28(7): 1112 – 1126.
- [49] Zhang R, Gupta R K, Davies C H J, et al. The influence of grain size and grain orientation on sensitization in AA5083[J]. *Corrosion*, 2015, 72(2): 160 – 168.
- [50] Ralston K D, Birbilis N. Effect of grain size on corrosion: A review[J]. *Corrosion*, 2010, 66(7): 075005 – 075013.
- [51] Rong Chang, Zeng, En Hou, et al. Corrosion and characterisation of dual phase Mg-Li-Ca alloy in Hank's solution: The influence of microstructural features[J]. *Corrosion Science* 2014, 79: 69 – 82
- [52] Loto C A, Loto R T. Corrosion behaviour of heat treated duplex ($\alpha\beta$) brass in nitric acid[J]. *Silicon*, 2018, 10(6): 2877 – 2888.
- [53] Krostad H N, Johnsen R. Corrosion properties of nickel-aluminum bronze in natural seawater—Effect of galvanic coupling to UNS S31603[J]. *Corrosion Science*, 2017, 121: 43 – 56.
- [54] Li M, Guo L Q, Qiao L J, et al. The mechanism of hydrogen-induced pitting corrosion in duplex stainless steel studied by SKP-FM[J]. *Corrosion Science*, 2012, 60: 76 – 81.
- [55] Shahryari A, Omanovic S, Szpunar J A. Electrochemical formation of highly pitting resistant passive films on a biomedical grade 316LVM stainless steel surface[J]. *Materials Science and Engineering: C*, 2008, 28(1): 94 – 106.
- [56] Qin Z, Zhang Q, Luo Q, et al. Microstructure design to improve the corrosion and cavitation corrosion resistance of a nickel-aluminum bronze[J]. *Corrosion Science*, 2018, 139: 255 – 266.
- [57] Sravanthi S S, Swati Ghosh Acharyya, Phani Prabhakar K V, et al. Integrity of 5052 Al-mild steel dissimilar welds fabricated using MIG-brazing and cold metal transfer in nitric acid medium[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, 268: 97 – 106.
- [58] Merino M, Pardo A, Arrabal R, et al. Influence of chloride ion concentration and temperature on the corrosion of Mg-Al alloys in salt fog[J]. *Corrosion Science*, 2010, 52(5): 1696 – 1704.
- [59] 李云涛, 李晓宁, 包俊成, 等. 2024 铝合金盐雾腐蚀评估及腐蚀形貌分析 [J]. *腐蚀与防护*, 2015, 36(9): 864 – 868.
Li Yuntao, Li Xiaoning, Bao Juncheng, et al. Salt spray corrosion evaluation and corrosion morphology analysis of 2024 aluminum alloy[J]. *Corrosion & Protection*, 2015, 36(9): 864 – 868.
- [60] 张艺凡. 铜铝层状复合材料在不同腐蚀介质中的腐蚀行为 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2021.
Zhang Yifan. Corrosion behavior of copper-aluminum laminated composites in different corrosive media[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2021.
- [61] Sravanthi S S, Acharyya S G, Phani Prabhakar K V, et al. Effect of Welding Parameters on the Corrosion Behavior of Dissimilar Alloy Welds of T6 AA6061 Al-Galvanized Mild Steel[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2018, 27(10): 5518 – 5531.
- [62] 苏永超. 钢铝异种金属交流双脉冲焊接接头组织及性能研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
Su Yongchao. Study on microstructure and properties of AC double pulse welded joints of steel and aluminum dissimilar metals[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2014.
- [63] Takehisa S, Iizuka T. Galvanic corrosion related to steel/aluminum dissimilar joining tailored blank[J]. *Key Engineering Materials*, 2014, 3193(611-612): 1460 – 1467.
- [64] Yoon B H, Shim J Y, Kang B Y. A study on the effect of plating layer on the corrosion properties of steel/al dissimilar magnetic pulse weldments[J]. *Journal of Welding and Joining*, 2020, 38(3): 305 – 310.
- [65] 王健. 激光高熵化填粉焊接铝/钢异种金属组织性能研究 [D]. 南昌: 华东交通大学, 2021.
Wang Jian. Study on microstructure and properties of aluminum / steel dissimilar metals welded by laser high entropy powder filling[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2021.

第一作者:徐灏, 博士研究生; 主要从事异种金属焊接接头腐蚀行为的研究; Email: xuhao_xhao@163.com.

通信作者:曹睿, 教授, 博士生导师; 主要从事新材料、异种材料的焊接性, 腐蚀损伤及断裂行为等研究; Email: caorui@lut.edu.cn.

(编辑: 张宏强)