

DOI: 10.3901/JME.2017.20.028

铝-钢异种金属搅拌摩擦焊研究现状及展望*

相 倩^{1,2} 吕念春² 薛 鹏¹ 马宗义¹

(1. 中国科学院金属研究所沈阳材料科学国家(联合)实验室 沈阳 110016;
2. 沈阳理工大学材料科学与工程学院 沈阳 110168)

摘要: 搅拌摩擦焊作为一种新型的固相连接技术, 具有优质、高效、节能、环境友好等优点, 广泛应用于航空航天、船舶、轨道交通、汽车等工业领域。为了实现车体轻量化, 铝-钢异种金属的搅拌摩擦焊研究得到越来越多的重视。从搅拌摩擦焊的工艺、组织及性能三个方面, 对铝-钢异种金属搅拌摩擦焊的国内外研究现状进行综述。研究现状表明, 通过控制界面金属间化合物的生成量, 可得到高质量的铝-钢异种金属的搅拌摩擦对焊、搭焊及点焊接头, 优化工艺参数下其拉伸性能可与母材相当, 然而在铝-钢界面的精细结构表征和复杂应力状态下接头的力学性能方面还需要进一步的深入研究。此外, 对未来铝-钢异种金属搅拌摩擦焊的研究方向进行展望。

关键词: 铝合金; 钢; 异种金属; 金属间化合物; 力学性能; 搅拌摩擦焊

中图分类号: TG406

Research Status and Prospect on Friction Stir Welded Dissimilar Al-Steel Joints

XIANG Qian^{1,2} LÜ Nianchun² XUE Peng¹ MA Zongyi¹

(1. Shenyang National Laboratory for Materials Science, Institute of Metal Research,
Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016;
2. Materials Science and Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110168)

Abstract: Friction stir welding (FSW) is a relatively new solid-state joining process, which is an energy efficient, environment friendly and versatile joining technique. Therefore it has been widely used in aerospace, marine, railway, automobile and other industrial fields. In order to realize the light weight of the vehicle, the research on the FSW of dissimilar Al alloy and steel has been paid more and more attention. In this review article, the current state of understanding and development on the FSW of Al alloy and steel are discussed. Particular emphasis was given to three aspects: the FSW parameters, microstructural evolution and mechanical properties. It is demonstrated that high-quality FSW joints of butt, lap and spot welding types can be obtained by controlling the formation of the intermetallic compounds on the Al-Fe interface, and the tensile strength is comparable to the Al base metal under optimized FSW parameters, however, further study is still needed to investigate the accurate microstructure of the Al-Fe interface and the mechanical behavior under complex stress state. At the same time, the further research and development direction in FSW of Al and steel are suggested.

Key words: aluminum alloy; steel; dissimilar metals; intermetallic compound; mechanical properties; friction stir welding

0 前言

铝合金的密度小、导电性、耐蚀性好, 而钢的强度高、塑性和韧性好。因此, 铝-钢异种金属的连接在航空、造船、石油化工、原子能、车辆制造等领域具有重要应用。在汽车制造领域, 采用轻质材

料是实现汽车轻量化的有效途径之一, 国外已将汽车上的部分钢结构用铝合金与钢的复合结构代替。2004 年宝马公司推出第一个采用铝-钢混合结构技术的车身; 2006 年奥迪公司在其新款 TT 跑车上应用了铝-钢混合车身结构。目前, 铝-钢混合结构仅在国外某些高端汽车制造上少量应用, 其高质量连接仍然是限制其广泛应用的瓶颈之一^[1], 而国内在铝-钢一体化框架车身的轻量化研究方面仍然处于起步阶段。

* 国家自然科学基金资助项目(51331008). 20160925 收到初稿, 20170205 收到修改稿

近年来, 铝-钢异种金属的连接引起了广泛的关注, 采用的连接方法主要有熔化焊、铆接、钎焊及固相焊等^[2]。铝-钢熔化焊过程中热输入量过大且难以控制, 因此极易产生脆性金属间化合物(Intermetallic compound, IMC), 严重影响接头的可靠性。铆接等机械连接技术由于适用性强在工业制造中广泛应用, 其不足之处在于外观质量较差, 而且未能实现冶金结合。依靠液态钎料对母材的润湿和扩散以及母材向钎料的溶解, 钎焊能实现异种金属的连接, 但钎焊效率低, 工艺较难控制, 对于工件尺寸及外形也有特殊的要求, 不利于批量生产。

爆炸焊、扩散焊、摩擦焊以及搅拌摩擦焊(Friction stir welding, FSW)等固相连接技术在焊接过程中材料不发生熔化, 可大大减少IMC的生成, 特别适用于异种金属的高质量连接。其中, FSW具有优质、高效、节能、无污染等诸多优点, 被誉为“绿色焊接技术”, 得到了广泛的关注。在FSW焊接过程中搅拌头高速旋转带动被焊工件接缝两侧的材料产生剧烈的塑性变形和混合, 同时轴肩对变形材料施加锻造作用, 从而形成致密无缺陷的焊缝^[3]。自发明后, FSW很快在铝合金领域成功商业应用, 并迅速推广到镁合金、铜合金等其他金属材料。此外, 在铝-钢、铝-铜、铝-镁等异种金属的连接领域也展现出了良好的应用前景。

1 铝-钢异种金属的焊接性

Al 和 Fe 的主要物理参数如表 1 所示^[4], 两种材料的物理性能相差较大, 采用熔化焊时很难形成良好的熔融结合, 在接头处极易形成裂纹、偏析、夹渣等缺陷^[5-6]。采用常规 FSW 时, 由于熔点相差 875 °C, 钢达到塑性流动变形时所需温度高于铝的熔点, 参数选用不当极易造成铝的熔化而出现宏观缺陷。即使采用低的热输入使温度低于铝的熔点, 两者之间也很难实现良好的塑性变形混合而得到无缺陷的焊缝。此外, 由于钢的熔点较高, 对铝-钢 FSW 工具也提出了很高的要求, 目前钢、钛合金等高熔点材料 FSW 工具的可靠性及寿命仍是制约其发展的瓶颈^[7]。

表 1 铝和铁的主要热物理参数

材 料	熔点/ °C	比热容/ [J·(kg·K) ⁻¹]	密度/(g·cm ⁻³)	线膨胀系数/10 ⁻⁸ ·K ⁻¹	热导率/[W·(m·K) ⁻¹]
Al	660	899.2	7.85	24	217.7
Fe	1 535	481.5	2.7	12	66.7

对于铝-钢的固相焊接来说, IMC 在其接头的成

形及焊接质量中起到至关重要的作用。要想实现铝与钢之间的冶金结合, IMC 必不可少。然而, 当生成过多的 IMC 时, 其脆性本质会大大降低接头的力学性能^[6-7]。根据图 1 所示的 Fe-Al 二元合金相图^[8], Al 与 Fe 之间会发生多种类型的化学反应并生成多种 IMC, 如 AlFe_3 、 AlFe 、 Al_2Fe 、 Al_5Fe_2 和 Al_3Fe 等。因此, 如何利用这些反应控制铝-钢界面 IMC 反应产物是实现铝-钢高质量 FSW 的关键所在。

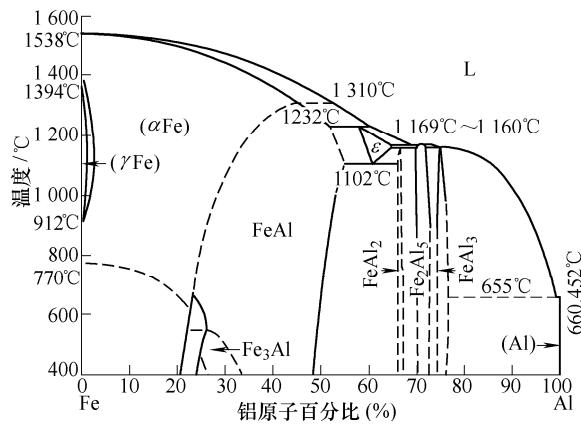


图 1 Fe-Al 二元合金相图

2 铝-钢 FSW 工艺

2.1 铝-钢 FSW 的对接

异种金属的 FSW 相对于同种金属更为复杂, 工艺影响因素也更多, 其中两个特殊而关键的因素为被焊材料的相对位置和搅拌针的偏置量。在 FSW 工艺中, 搅拌头旋转方向与焊接方向一致的一侧为前进侧(Advancing side, AS), 而方向相反的一侧为后退侧(Retreating side, RS), 如图 2a 所示^[9]。由于铝合金与钢的流动性能明显不同, 因此被焊材料的相对位置会显著影响 FSW 接头的成形。KOVACEVIC 研究组^[11-12]对 6061 铝合金与 AISI1080 钢的 FSW 研究表明, 钢置于 AS 和 RS 都能得到无宏观缺陷的接头。但若采用的偏置量较大(即搅拌针大部分在铝合金侧), 当钢位于 RS 时, 焊缝成形较差^[12]。WATANABE 等^[13]则发现当搅拌针旋转方向为逆时针时焊缝表面出现长的裂纹缺陷, 而采用顺时针旋转时可获得无缺陷的 FSW 接头。

事实上, 搅拌针旋转方向并不是造成焊缝表面质量差的本质原因, 决定因素应该是较硬的钢在 FSW 过程中所处的位置, 即钢处于 AS 还是 RS。绝大多数研究表明, 对于异种材料的 FSW, 硬材料处于 AS 时, 焊缝成形良好, 且性能优异^[9-13]。这是由于焊缝成形位置在搅拌头后侧, 此区域的材料由

RS 流向 AS。因此，软材料置于 RS 时，异种金属可以很容易地混合，从而得到优质的 FSW 接头；而硬材料位于 RS 时，则很难向 AS 流动，容易形成缺陷。

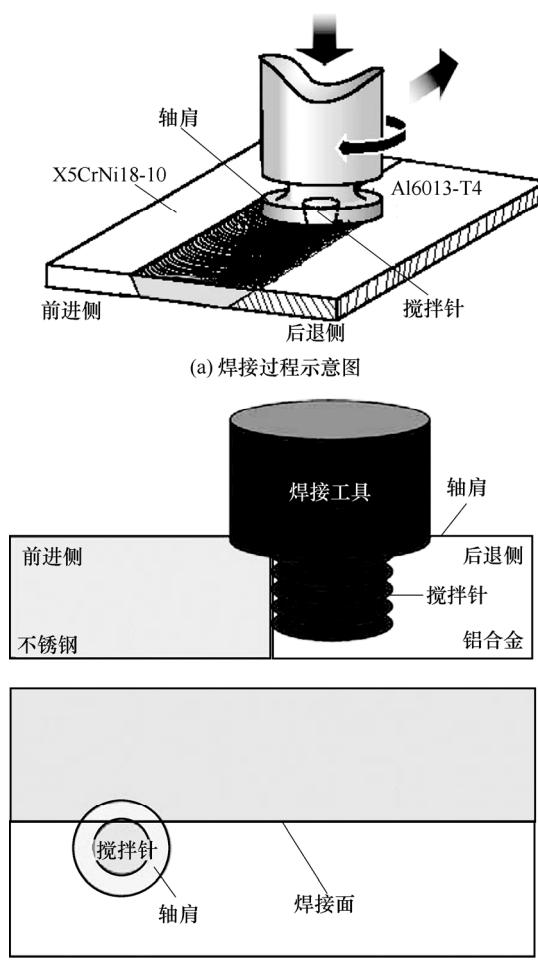


图 2 铝-不锈钢异种金属 FSW 示意图

在铝-钢 FSW 中，起初研究者采用搅拌针完全偏置铝侧(即搅拌针完全在铝侧)的方法来保护搅拌针，并防止铝合金过热熔化，如图 2b 所示^[10]。后来，越来越多的研究表明，采用搅拌针向铝侧偏置可以得到较好的焊接质量，而搅拌针偏置量的大小也成为影响异种金属 FSW 的关键因素。

对于异种金属的 FSW，如果不采用搅拌针偏置，由于两种材料的性能差异很难得到无缺陷的焊缝，且极易生成大量脆性 IMC，导致接头性能明显降低，对于厚度大于 3 mm 的厚板来说情况更为严重。然而如果采用搅拌针完全偏置铝合金侧的工艺，虽然可得到无缺陷的焊缝，但此种情况下不能产生足够热量，IMC 的生成也得到抑制，铝-钢之间的冶金结合往往较差^[9]。

大量的研究表明，当搅拌针大部分位于较软的铝合金一侧时，性能最好^[9-13]。此时，由于少部分

钢受到搅拌针的搅动及与工具的摩擦作用，产生的热量适中，在界面上可以形成达到铝-钢冶金结合所需要的少量 IMC。此外，由于只有少部分的钢受到搅动，焊核区中的钢颗粒数量少且尺寸较小，可以很容易地与铝基体进行混合并形成有效的冶金结合，并弥散分布于焊核区，增强了焊核区力学性能。

2.2 铝-钢 FSW 的搭接

利用 FSW 实现铝和钢的搭接，热输入量小，接头的性能相对较高，不需要添加焊接材料，同时接头的类型不受限制，因而受到了国内外学者的广泛关注^[9, 14-19]。FSW 过程中热输入量的大小决定了焊接热循环中热量的多少，主导着焊缝成形和接头性能，主要由转速、焊接速度、搅拌头倾角等工艺参数控制。KIMAPONG 等^[14-15]对铝-低碳钢进行 FSW 搭接时发现随着热输入量增加，接头剪切断裂应力提高。然而当热输入进一步提高时，有大量的 IMC 生成，也会降低接头的力学性能。显然，控制热输入量生成适量的 IMC 以增强冶金结合也是得到高质量铝-钢 FSW 搭接接头的关键所在。

对于铝-钢的异种金属搭接而言，与 FSW 对接类似，被焊材料的相对位置以及搅拌针的下压量(压入下板中的深度)对焊缝成形同样起到关键作用。若钢位于上侧，钢板中搅拌区温度会高于铝合金熔点，造成下方的铝板熔化，无法形成连接。因此通常将铝合金置于上方，以利于材料流动、焊缝成形，同时对搅拌头磨损也较小。FSW 搭接是通过搅拌头的剧烈搅拌作用实现铝和钢的冶金结合，搅拌针的下压量直接决定了搭接界面的结合状态，同时也影响到界面 IMC 的生成量，是影响搭接焊缝强度的重要因素^[14-19]。

对于铝-钢的 FSW 搭接来说，下压量过小会导致铝-钢界面无法形成良好的冶金结合，接头强度弱。然而，若下压量过大，会造成塑性流动的铝被挤出轴肩，材料无法良好地循环流动，影响焊缝成形。而且极易形成“Hook”缺陷造成上板的过度减薄而大大降低接头性能^[14-15]。与 FSW 对接类似，通常采用较小下压量使少量的钢进入焊核区与铝基体混合，可避免或减弱“Hook”缺陷产生，同时热输入量适宜，在铝-钢界面生成少量 IMC 增强界面结合强度。ELREFAEY 等^[16-17]的结果表明当采用适当的搅拌针压入钢板深度(下压量)为 0.1 mm 时，可明显提高接头的力学性能。

由于较小的下压量很难控制，极易造成界面达不到有效冶金结合。因此，可对被焊材料做焊前处理以提高 Al、Fe 之间的冶金结合性。此时，下压量

为0时也能得到很好的搭接接头。例如, CHEN等^[18]研究了钢表面状态对铝-钢 FSW 搭接的影响, 分别选取了镀锌钢板、表面打磨的钢板和未经任何处理的钢板与 AC4C 铝合金进行焊接, 发现镀锌钢板与铝合金的接头强度要远远高于表面打磨处理和未处理钢板与铝合金的接头。这是由于在接头的界面区域形成了 Zn-Al 低熔共晶, 从而促进了 Al 和 Fe 元素的相互融合。

2.3 铝-钢搅拌摩擦点焊

点焊是汽车车身薄板焊接使用最广泛的焊接方法之一, 铝-钢异种金属点焊在异种材料焊接领域受到越来越广泛的重视。搅拌摩擦点焊(Friction stir spot welding, FSSW)是基于 FSW 技术, 使搅拌头和工件不产生相对移动, 形成面积较小的点焊接头的焊接方式^[20-29]。FSSW 与 FSW 的搭接工艺类似, 但此时焊接工具没有前移, 因此搅拌头转速和停留时间成为制约接头性能的重要因素。

对于常规的铝-钢 FSSW 来说, 提高搅拌头转速, 可导致更多的钢颗粒进入搅拌区, 拉伸载荷增加^[25]。随着停留时间的增加, 导致搅拌针周围更大范围发生塑性变形, 从而增加了焊接面积, 提高接头连接强度^[26]。但停留时间较长反而会增加 IMC 的生成量, 硬脆的 IMC 会显著削弱接头的塑、韧性。而对于实际的工业应用来说, 在焊接质量满足要求的条件下, 采用较高的转速尽可能地减少停留时间以提高焊接效率需要重点关注。

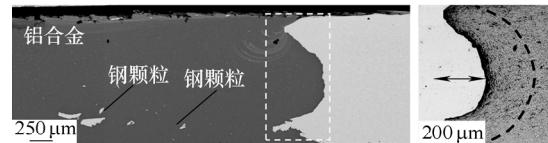
普通 FSSW 接头中, 常常因为搅拌针的退出在焊点中心处留下匙孔, 影响接头强度, 这也是一直制约 FSSW 工业应用的瓶颈。通常, 可使用可伸缩搅拌头或者无针搅拌头等 FSSW 工艺消除匙孔。德国的 Kuka 和日本的 Kawasaki 等公司已经成功制造出带可伸缩搅拌头的工业点焊机器人。对于 1 mm 及以下的薄板来说, 采用无针搅拌头即可实现高质量的 FSSW, 此时与搭接时类似, 采用表面处理的方式, 如镀锌层可以增加铝-钢间的冶金结合能力, 提高接头强度^[24]。

3 铝-钢 FSW 接头微观组织

3.1 铝-钢接头微观组织

绝大多数铝-钢 FSW 对接采用搅拌头偏置在铝侧的方式, 在这种情况下接头横截面铝侧仍可观察到类似“洋葱环”的涡旋状流动形式, 但此时“洋葱环”结构与铝合金接头中的相比特征并不明显^[30-33]。此外, 钢侧与焊核存在明显的界面且呈曲

线形, 而铝侧和焊核并没有明显的界线, 如图 3 所示^[32]。焊核区为铝基体和钢颗粒组成的复合组织^[33], 不同大小和形状的钢颗粒不均匀地分布在铝基体中, 在焊核底部及界面附近可形成颗粒富集区, 如图 4 所示。

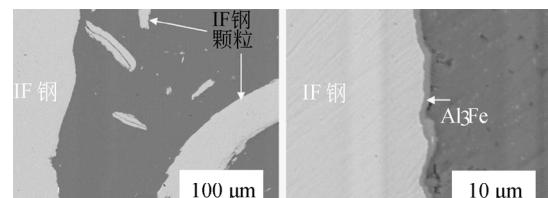


(a) 铝合金 - HC260 低合金高强钢接头

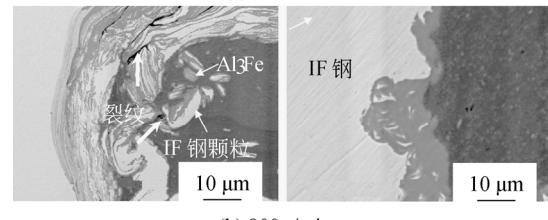


(b) 铝合金 - DP600 高强钢接头

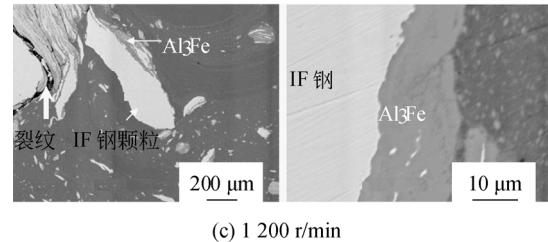
图 3 铝-钢 FSW 对接接头横截面形貌



(a) 600 r/min



(b) 900 r/min



(c) 1 200 r/min

图 4 不同转速下铝-钢 FSW 对接接头 SEM 形貌

铝基体中的钢颗粒是 FSW 过程中在搅拌针的搅动作用下, 从钢基体上剥离并破碎后分布到铝基体中的。在热和剧烈塑性变形的联合作用下, 钢颗粒会与周围的铝基体之间发生反应在界面生成 IMC, 从而达到良好的冶金结合, 而细小的钢颗粒则直接生成了 IMC^[30-33]。同时, 弥散分布的钢颗粒及 IMC 还可起到增强铝基体的作用, 所以焊核区也可看作颗粒增强的铝基复合材料, 其性能通常高于铝母材。

从图 4 可以看出, 铝-钢界面结合状态与转速密切相关, 界面的 IMC 厚度随转速的升高而增大, 而且在高转速下, 堆垛的层状结构易在界面附近形成^[33]。在高转速 FSW 时, 温度较高, 钢母材变软, 同时由于搅拌针的搅动作用增强, 层片状的钢(钢片层)很容易从基体上剥落, 而且同铝基体发生反应, 导致堆垛层状结构的形成。当尺寸较大的钢片层在界面附近存在时, 后来剥落的钢片层很难在焊核中充分流动, 只能在界面附近堆积, 形成非常厚的堆垛层状结构, 如图 4c、4e 所示^[10, 33]。此时, 由于材料流动的局部受限, 极易产生孔洞及裂纹缺陷。因此, 如何优化 FSW 参数抑制或减少堆垛层状结构的形成是获得高性能接头的关键。

对于铝-钢 FSW 的搭接接头^[15-16, 34-38], 由于搅拌针的搅动作用, 钢在铝合金母材侧会形成钩状突起结构, 即“Hook”缺陷。“Hook”缺陷的存在会对上部的板材造成严重的减薄作用, 明显降低接头的力学性能。“Hook”缺陷的产生与材料的流动密切相关, 由于搭焊时搅拌针要插入下板一定深度, 此时下板中搅拌针周围的材料也会发生塑性变形并随着材料流动而发生变化。通常搅拌针底部有向上的流动作用力, 因此搅拌针周围的材料会向上板中延伸, 从而造成“Hook”缺陷的产生。

在 FSW 搭接接头焊核区界面附近仍能观察到钢及 IMC 形成的堆垛层状结构, 而且在“Hook 缺陷”附近尤为明显, 如图 5 所示。在焊核区纵截面

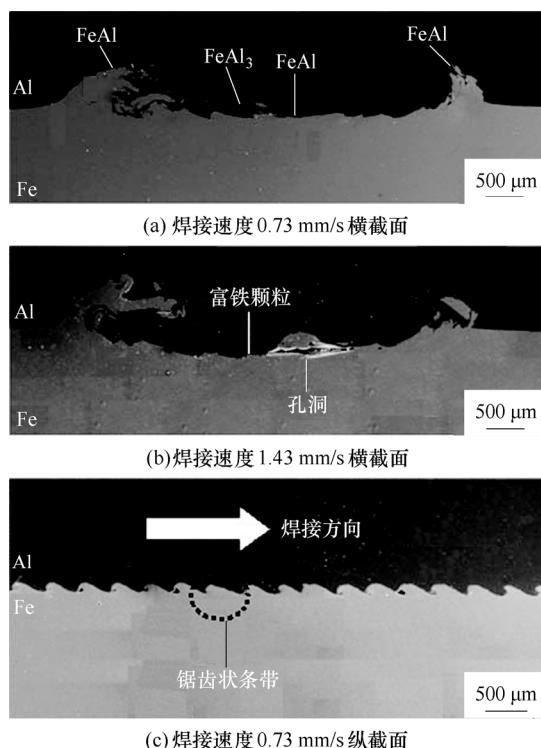


图 5 转速 225 r/min 时搭接界面 SEM 形貌

上还可以观察到锯齿状条纹^[15], 这种锯齿形状的形成与“Hook 缺陷”类似, 是由于在搅拌头的作用下, 塑化的钢被挤向铝侧, 并随着搅拌头向前运动, 形成锯齿状。然后塑化的 Al 随搅拌头向后移动, 填补空腔, 与 Fe 形成 IMC, 从而形成锯齿条纹。

3.2 铝-钢 FSW 接头界面金属间化合物

对于异种金属的 FSW, 两种金属之间有效的冶金结合需要少量 IMC 作为过渡界面, 但是过多的 IMC 形成则容易降低接头性能, 甚至影响完整接头的形成。因此对 FSW 异种金属接头尤其是界面处的 IMC 的研究尤为重要^[39]。异种金属之间的固态反应与平衡凝固过程中的反应不完全相同, 而且由于剧烈塑性变形的作用使得在 FSW 过程中铝-铁间的反应更为复杂。

目前, 少数研究者对铝-钢界面处 IMC 进行了深入研究^[10, 13]。WANTANABE 等^[13]对铝-钢 FSW 接头界面的 IMC 用能谱进行了定性分析, 如图 6 所示。在铝-钢界面区, 根据能谱分析, 点 1、2 两处的 IMC 分别为 AlFe 和 Al₃Fe, 而点 2 处 Al₃Fe 的硬度可达 641 HV。他们认为铝-钢界面上过多 IMC 的存在会降低接头力学性能。

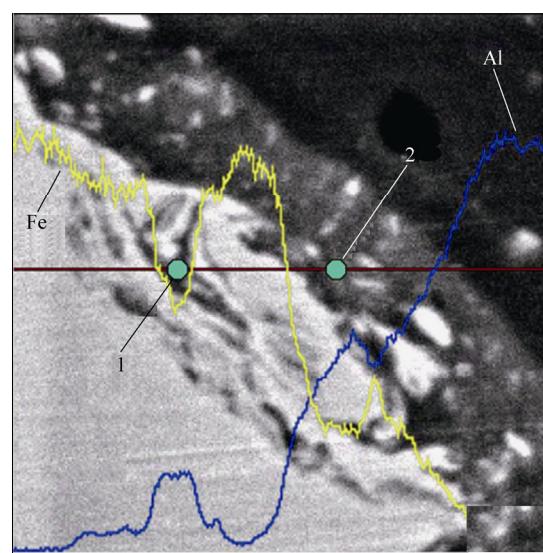
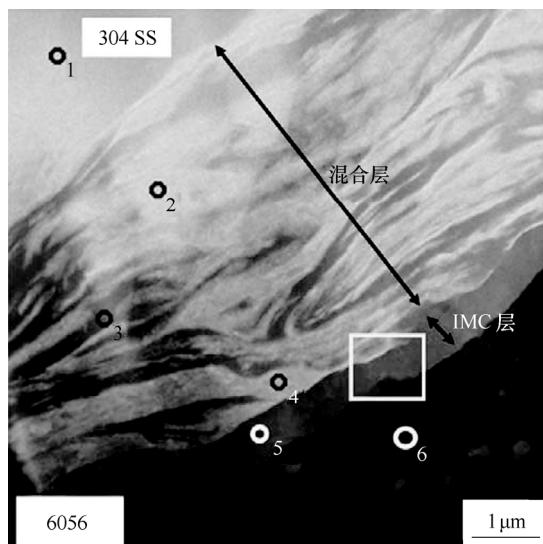


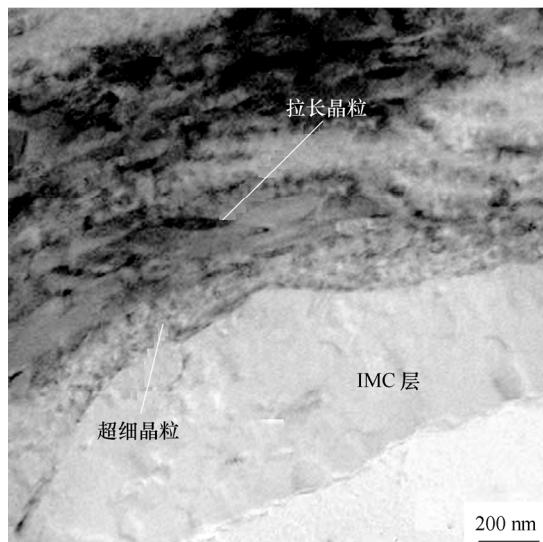
图 6 铝-钢 FSW 接头界面 SEM 形貌

只有极少数研究者采用 TEM 等手段对铝-钢 FSW 接头界面处的 IMC 形貌及种类进行了精确表征^[10, 40-42]。LEE 等^[10]早期对铝-钢 FSW 对接界面的分析表明, 铝-钢界面是由混合层和 IMC 层构成, 如图 7 所示。IMC 层的成分经电子衍射分析确定为具有密排六方结构的 Al₄Fe, 且厚度大约为 250 nm。混合层中观察到了拉长的晶粒和超细晶, 其中拉长晶粒形成的原因归结为在搅拌针的搅动及温升作用

下, 奥氏体转变为铁素体, 形成体心立方结构, 材料发生塑性流动使晶粒拉长。



(a) 界面区域形貌

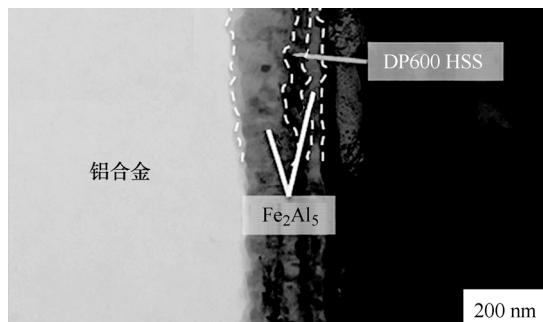


(b) 图 7a 方框中的混合层和IMC 层放大图

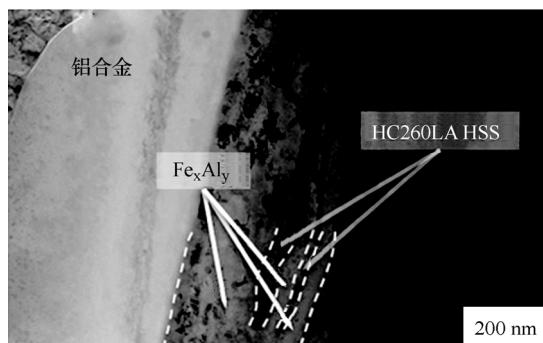
图 7 铝-钢 FSW 界面区 TEM 形貌

COELHO 等^[32]也采用 TEM 的方法对铝合金与高强钢界面处的 IMC 层进行了研究, 观察到界面处组织也呈带状分布, 通过对 IMC 层衍射分析判断 IMC 化合物为 Al_5Fe_2 , 如图 8 所示。同样, SPRINGER 等^[40-41]在铝-钢 FSW 接头界面处也发现了 Al_5Fe_2 化合物层, 并通过热处理方法对 Al_5Fe_2 化合物的生成及长大机制进行了研究。

由于性能优异的铝-钢 FSW 接头界面 IMC 层厚度非常薄, 从而对其进行精确表征比较困难, 目前对于 FSW 接头铝-钢界面精细结构的认识还远远不够, 甚至对于界面生成何种 IMC 仍未达成共识, 还需大量细致的研究工作对界面 IMC 进行表征, 并深入研究 IMC 层对接头力学性能的影响机制。



(a) 铝合金 - DP600 钢接头



(b) 铝合金 - HC260 钢接头

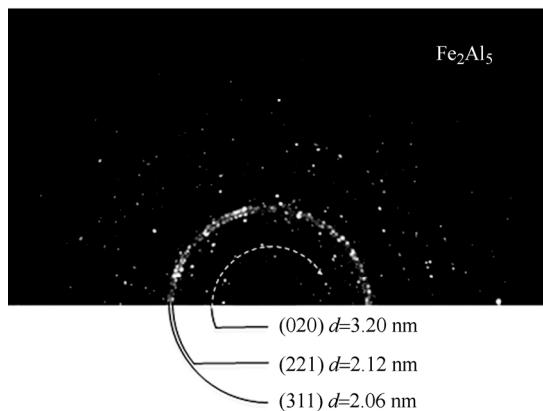
(c) 铝合金 - DP600 钢界面生成的 Fe_2Al_5 衍射环

图 8 铝-高强钢 FSW 接头界面 TEM 研究

(图中 d 为晶面间距)

4 铝-钢 FSW 接头力学性能

通常对于铝-钢异种金属焊接接头力学性能的研究, 大都集中在对显微硬度、拉伸性能、弯曲性能等简单的基本力学性能, 而对于复杂动载荷服役条件下的疲劳性能研究相对较少^[9]。

4.1 显微硬度

绝大多数研究者对铝-钢异种金属 FSW 接头硬度分布的研究结果比较一致。图 9 所示为铝-钢异种金属 FSW 接头典型的显微硬度分布图。由于受到机械作用产生强化, 钢侧热机影响区(Thermal mechanical affected zone, TMAZ)的硬度有时会高于

母材；而对于铝合金侧，热循环作用比较明显，强化相发生溶解或粗化，有软化趋势，因此铝侧的 TMAZ 及热影响区(Heat affected zone, HAZ)硬度较母材有所降低。

通常，大量钢颗粒及 IMC 分布在焊核区，而且钢颗粒的尺寸、形态都不相同，造成焊核区的硬度分布极不均匀。由于 IMC 的硬度比金属基体明显升高，通常接头硬度峰值出现在焊核区，甚至可高达 641 HV^[12-13]。

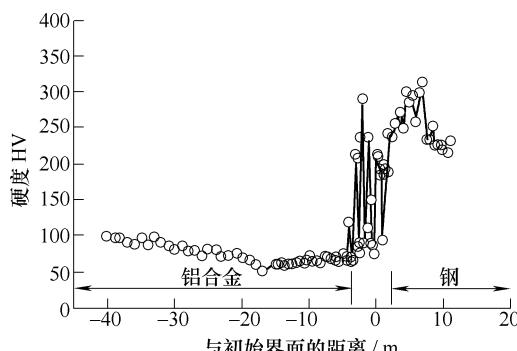


图 9 铝-钢 FSW 接头横截面显微硬度分布

4.2 拉伸性能

与熔化焊相比，铝-钢 FSW 接头的拉伸性能一般能有明显提高。然而，当工艺参数选择不当时，虽然可以获得无缺陷接头，但由于过多的 IMC 生成，拉伸断裂一般发生在焊核或与钢的界面处，使接头强度明显降低，而且由于脆硬的 IMC 存在，断裂模式一般为脆性断裂^[9-15]。而在优化的工艺参数下，铝-钢 FSW 接头拉伸断在铝侧焊核区或热影响区，拉伸强度可与铝母材相当^[12]。

KIMAPONG 等^[15]在对 5083 铝合金和 SS400 钢的 FSW 搭焊研究中表明，IMC 的产生对接头力学性能产生明显影响。转速过高会生成大量 FeAl₃ IMC，严重降低接头拉伸性能；而在较低的转速时，接头断裂在铝合金侧，呈现出韧性断裂特征，剪切力最高可达到 5.59 kN。而对于 FSSW 来说，采用高转速则有利于缩短焊接时间，提高焊接效率则需要提高转速。同时，锌镀层的存在有助于在铝-钢搭接界面处生成 IMC 薄层，从而提高接头力学性能，在高转速 3 200 r/min 保压 3 s 时拉伸剪切力可高达 8.4 kN^[25]。

显然，不论是铝-钢的搭接还是对接 FSW，接头中 IMC 的含量都直接影响接头的强度，接头拉伸强度、剪切强度都随着 IMC 层的厚度的增加先升高后降低^[17]。如何控制界面及焊核区 IMC 的生成量成为取得优异接头的关键因素。

4.3 疲劳性能

疲劳性能是实际工程应用中最重要的力学性能指标，是决定材料及结构能否应用的最终判据。然而，目前对铝-钢 FSW 接头疲劳性能研究较为缺乏，只有少数研究者对其疲劳强度进行了初步研究。UZUN 等^[9]对 6013-T4 铝合金与 X5CrNi18-10 不锈钢 FSW 对接接头进行了高周疲劳试验，得到的 S-N 曲线如图 10 所示。FSW 接头的疲劳寿命与 T6 态铝合金母材相比降低 30%，其中裂纹常在焊核区根部未充分搅拌的区域萌生。

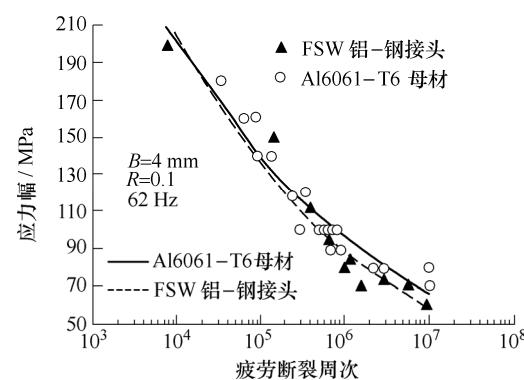


图 10 铝合金-不锈钢 FSW 接头的 S-N 疲劳曲线

IBRAHIM 等^[28]研究了铝-钢 FSSW 接头的最大切应力与疲劳寿命间的关系，发现在同等剪切力作用下，镀锌钢板接头的疲劳寿命要高于未镀锌钢板，如图 11 所示。TRAN 等^[43]采用单向剪切试样和十字剪切两种试样分析了不同加载方式下 6xxx 系铝合金和镀锌钢异种金属 FSSW 接头疲劳性能，并利用三维有限元分析阐明了疲劳裂纹生长机理，表明疲劳裂纹主要沿铝-钢界面萌生和扩展。

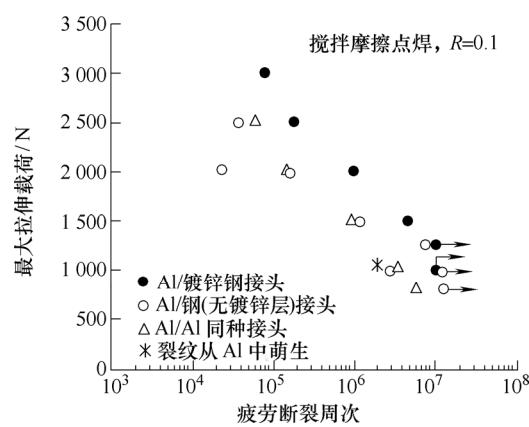


图 11 铝-钢 FSSW 接头最大剪切力与疲劳寿命关系

目前，只有少数研究者对接头的高周疲劳性能进行了初步研究，虽然得到的疲劳性能较好，但对于具体的疲劳裂纹萌生及扩展机制还未得到深入认识，从而对接头疲劳性能的进一步提高缺乏理论依

据。因此,对于微观组织对疲劳行为的影响规律,尤其是低周疲劳过程中界面及焊核区的IMC对疲劳裂纹的作用机制还需要进一步深入研究。

5 结论

作为一种固相焊接工艺,FSW在铝-钢异种金属的焊接中体现出了明显的优势。通过优化工艺参数,可控制铝-钢界面IMC的生成量及分布状态,从而提高接头力学性能。目前,通过FSW方法可实现铝-钢的对焊、搭焊及点焊等多种形式的高质量焊接,在优化工艺参数下可获得与铝合金母材等强的接头。然而,目前对铝-钢FSW接头界面表征和动态力学性能的研究相对较少。

因此,在未来的研究工作中应重点关注铝-钢FSW接头界面微观组织,尤其是IMC的精细结构表征,以深入理解界面特征对接头性能的作用机制。在力学性能研究方面,对铝-钢接头在复杂动态载荷作用下的服役行为还需要更多的研究工作,特别是IMC对疲劳裂纹萌生和扩展的作用机制需要深入理解,从而为实际工业应用奠定基础。此外,如何提高焊接工具的可靠性和寿命、通过改善FSW工艺提高接头成形效率、提高FSW设备的自动化水平也是未来铝-钢FSW在实际工业化应用中需要重点关注的问题。

参 考 文 献

- [1] 龙江启, 兰凤崇, 陈吉清. 车身轻量化与钢铝一体化架构新技术研究进展[J]. 机械工程学报, 2008, 44(6): 27-35.
LONG Jiangqi, LAN Fengchong, CHEN Jiqing. New technology of lightweight and steel-aluminum hybrid structure car body[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(6): 27-35.
- [2] 邢亮, 马向东, 李龙波, 等. 铝合金与钢的焊接现状及发展趋势[J/OL]. 中国科技论文在线, 2013[2013-04-01]. <http://www.paper.edu.cn/html/releasenew/2013/04/18/>.
XING Liang, MA Xiangdong, LI Longbo, et al. The study progress and development on the welding of Al alloys to steel[J]. Sciencepaper Online , 2013[2013-04-01]. <http://www.paper.edu.cn/html/releasenew/2013/04/18/>.
- [3] MISHRA R S, MA Z Y. Friction stir welding and processing[J]. Materials Science and Engineering R, 2005, 50(1-2): 1-78.
- [4] 汪建梅. 铝与钢异种材料焊接工艺研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2013.
- [5] WANG Jianmei. Welding research of aluminum-steel dissimilar materials[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2013.
- [6] 李亚江. 焊接冶金学—材料焊接性[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [7] LI Yajiang. Welding metallurgy-weldability of materials[M]. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [8] 李亚江, 王娟, 刘鹏. 异种难焊材料的焊接及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [9] LI Yajiang, WANG Juan, LIU Peng. Welding and application of hard-to-weld dissimilar materials[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003.
- [10] XUE Peng, ZHANG Xingxing, WU Lihui, et al. Research progress on friction stir welding and processing[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2016, 52(10): 1222-1238.
- [11] MASSALSKI T B. Binary alloy phase diagrams[M]. New York: ASM International, 1990.
- [12] UZUN H, DONNE C D, ARGAGNOTTO A, et al. Friction stir welding of dissimilar Al6013-T4 to X5CrNi18-10 stainless steel[J]. Materials & Design, 2005, 26(1): 41-46.
- [13] LEE W B, SCHMUECKER M, MERCARDO U A, et al. Interfacial reaction in steel-aluminum joints made by friction stir welding[J]. Scripta Materialia, 2006, 55(4): 355-358.
- [14] CHEN C M, KOVACEVIC R. Joining of Al 6061 alloy to AISI1018 steel by combined effects of fusion and solid state welding[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004, 44(11): 1205-1214.
- [15] JIANG W H, KOVACEVIC R. Feasibility study of friction stir welding of 6061-T6 aluminum with AISI 1018 steel[J]. Journal of Engineering Manufacture, 2004, 218(10): 1323-1331.
- [16] WATANABE T, TAKAYAMA H, YANAGISAWA A. Joining of aluminum alloy to steel by friction stir welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 178(1-2): 342-349.
- [17] KIMAPONG K, WATANABE T. Effect of Welding process parameters on mechanical property of FSW lap joint between aluminum alloy and steel[J]. Materials Transactions, 2005, 46(10): 2211-2217.
- [18] KIMAPONG K, WATANABE T. Lap joint of A5083 aluminum alloy and SS400 steel by friction stir welding

- [J]. Materials Transactions, 2005, 46(4): 835-841.
- [16] ELREFAEY A, GOUDA M, TAKAHASHI M. Characterization of aluminum/steel lap joint by friction stir welding [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2005, 14(1): 10-17.
- [17] ELREFAEY A, TAKAHASHI M, IKEUCHI K. Friction-stir-welded lap joint of aluminum to zinc-coated steel[J]. Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 2010, 23(2): 186-193.
- [18] CHEN Y C, NAKATA K. Effect of the surface state of steel on the microstructure and mechanical properties of dissimilar metal lap joints of aluminum and steel by friction stir welding[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2009, 39(8): 1985-1992.
- [19] 张贵锋, 苏伟, 韦中新, 等. 搅拌摩擦钎焊制备铝/钢防腐双金属复合板新技术[J]. 焊管, 2010, 33(3): 18-24. ZHANG Guifeng, SU Wei, WEI Zhongxin, et al. Fabrication of Al/steel bimetallic composite plate by a novel process of friction stir brazing (FSB)[J]. Welded Pipe and Tube, 2010, 33(3): 18-24.
- [20] THOMAS W M, NICHOLAS E D, NEEDHAM J C, et al. Friction welding [P]. US Patent 5460317, 1995.
- [21] 王希靖, 张亚州, 张忠科, 等. 铝/钢无匙孔搅拌摩擦点焊焊接性分析[J]. 焊接学报, 2015, 36(1): 1-4. WANG Xijing, ZHANG Yazhou, ZHANG Zhongke, et al. Welding analyses of friction stir spot welding without keyhole between aluminum alloy and zinc-coated steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(1): 1-4.
- [22] SPINELLA D J, BROCKENBROUGH J R, FRIDY J M. Trends in aluminum resistance spot welding for the automotive industry[J]. Welding Journal, 2005, 84(1): 34-40.
- [23] 秦红珊, 杨新岐. 一种替代传统电阻点焊的创新技术—搅拌摩擦点焊[J]. 电焊机, 2006, 36(7): 27-40. QIN Hongshan, YANG Xinqi. A new innovative joining technology to replace conventional resistance spot welding-friction stir spot welding[J]. Electric Welding Machine, 2006, 36(7): 27-40.
- [24] MIYAGAWA K, TSUBAKI M, YASUI T, et al. Spot welding between aluminium alloy and low-carbon steel by friction stirring[J]. Welding International, 2009, 23(8): 559-564.
- [25] FIGNER G, VALIANT R, WEINBERGER T, et al. Friction stir spot welds between aluminium and steel automotive sheets: Influence of welding parameters on mechanical properties and microstructure[J]. Welding in the World, 2009, 53(1-2): 13-23.
- [26] BOZZI S, ETTER A L, BAUDIN T. Mechanical behavior and microstructure of aluminum-steel sheets joined by FSSW[J]. Texture Stress and Microstructure, 2008, 28: 1-8.
- [27] FEREIDUNI E, MOVAHEDI M, KOKABI A H. Aluminum/steel joints made by an alternative friction stir spot welding process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 224: 1-10.
- [28] IBRAHIM I, UEMATSU Y, KAKIUCHI T. Fatigue behaviour of dissimilar Al alloy/galvanised steel friction stir spot welds fabricated by scroll grooved tool without probe[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2015, 20(8): 670-678.
- [29] CHEN Y C, GHOLINIA A, PRANGNELL P B. Interface structure and bonding in abrasion circle friction stir spot welding: A novel approach for rapid welding aluminium alloy to steel automotive sheet[J]. Materials Chemistry and Physics, 2012, 134(1): 459-463.
- [30] DEHGHANI M, AKBARI MOUSAVI S A A, AMADEH A. Effects of welding parameters and tool geometry on properties of 3003-H18 aluminum alloy to mild steel friction stir weld[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(7): 1957-1965.
- [31] LIU X, LAN S H, NI J. Analysis of process parameters effects on friction stir welding of dissimilar aluminum alloy to advanced high strength steel[J]. Materials & Design, 2014, 59: 50-62.
- [32] COELHO R S, KOSTKA A, dos SANTOS J F, et al. Friction-stir dissimilar welding of aluminium alloy to high strength steels: Mechanical properties and their relation to microstructure[J]. Materials Science and Engineering A, 2012, 556: 175-183.
- [33] KUNDU S, ROY D, BHOLA R, et al. Microstructure and tensile strength of friction stir welded joints between interstitial free steel and commercially pure aluminium[J]. Materials & Design, 2013, 50: 370-375.
- [34] 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.
- [35] HAGHSHENAS M, ABDEL-GWAD A, OMRAN A M. Friction stir weld assisted diffusion bonding of 5754 aluminum alloy to coated high strength steels[J].

- Materials & Design, 2014, 55: 442-449.
- [36] OGURA T, SAITO Y, NISHIDA T. Partitioning evaluation of mechanical properties and the interfacial microstructure in a friction stir welded aluminum alloy/stainless steel lap joint[J]. Scripta Materialia, 2012, 66(8): 531-534.
- [37] OGURA T, NISHIDA T, TANAKA Y. Microscale evaluation of mechanical properties of friction stir welded A6061 aluminium alloy/304 stainless steel dissimilar lap joint[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2013, 18(2): 108-113.
- [38] MOVAHEDI M, KOKABI A H, REIHANI S M S. Effect of annealing treatment on joint strength of aluminum/steel friction stir lap weld[J]. Materials & Design, 2013, 44: 487-492.
- [39] XUE P, XIAO B L, NI D R, et al. Enhanced mechanical properties of friction stir welded dissimilar Al - Cu joint by intermetallic compounds[J]. Materials Science and Engineering A, 2010, 527(21-22): 5723-5727.
- [40] SPRINGER H, KOSTKA A, dos SANTOS J F. Influence of intermetallic phases and Kirkendall-porosity on the mechanical properties of joints between steel and aluminium alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 2011, 528(13-14): 4630-4642.
- [41] SPRINGER H, KOSTKA A, PAYTON E J. On the formation and growth of intermetallic phases during interdiffusion between low-carbon steel and aluminum alloys[J]. Acta Materialia, 2011, 59(4): 1586-1600.
- [42] BOZZI S, HELBERT-ETTER A L, BAUDIN T. Intermetallic compounds in Al 6016/IF-steel friction stir spot welds[J]. Materials Science and Engineering A, 2010, 527(16-17): 4505-4509.
- [43] TRAN V X, PAN J. Fatigue behavior of dissimilar spot friction welds in lap-shear and cross-tension specimens of aluminum and steel sheets[J]. International Journal of Fatigue, 2010, 32(7): 1167-1179.

作者简介: 相倩, 女, 1992年出生。主要研究方向为异种金属搅拌摩擦焊。

E-mail: 15942008369@163.com

薛鹏(通信作者), 男, 1984年出生, 博士, 副研究员。主要研究方向为搅拌摩擦焊接与加工、超细晶材料的制备及力学行为。

E-mail: pxue@imr.ac.cn