

[文章编号] 1003-4684(2024)02-0023-06

工艺参数对镁/钢搅拌摩擦搭接焊组织与性能的影响

赵一帆^{1,2,3}, 胡心彬^{1,2,3}, 沈小琨^{1,2,3}

(1 湖北工业大学材料与化学工程学院, 湖北 武汉 430068; 2 绿色轻工材料湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430068;

3 车用轻质材料与加工湖北省工程实验室, 湖北 武汉 430068)

[摘 要] 对 2.5 mm 厚的 AZ31B 镁合金和 2 mm 厚的 DP600 高强钢平板进行搅拌摩擦搭接焊连接实验。通过金相显微镜(OM)、扫描电子显微镜(SEM)、射线衍射仪(XRD)、拉伸实验和硬度测试, 研究工艺参数对镁/钢搭接接头显微组织、连接机理和力学性能影响。结果表明: 镁/钢接头连接机制为机械结合, 且随着焊接进给速度增大, 接头拉伸性能降低; 随着旋转速度增大, 接头拉伸性能先增强再降低。在进给速度 80 mm/min, 旋转速度 900 r/min 时达到最大剪切破坏载荷为 295.8 N/mm。界面处晶粒细化显著, 硬度明显高于母材。

[关键词] 镁合金; 高强钢; 搅拌摩擦搭接焊; 接头性能

[中图分类号] TG40 **[文献标识码]** A

为了提高能源效率, 节能减排, 轻质材料在汽车车身的应用逐年提升^[1-2]。镁合金是金属中最轻的结构材料之一, 密度为 1.78 g/cm³, 为铝密度的 2/3, 钢密度的 1/4, 同时具有较高的比强度、较好的减震性和易于回收利用等优点, 被广泛用于航空航天以及汽车制造业^[3]。钢仍是目前应用最广的结构材料, 大量运用于汽车制造工业中。镁合金与钢连接的混合结构可以将两种材料的优势结合起来, 在降低汽车车身重量的同时, 保证车身强度。因此, 镁合金和钢之间的连接具有重要意义。

由于镁/钢两种材料在物理性质和化学性质上具有很大的差异, 镁(650℃)和钢(1539℃)的熔点相差较大, 镁的沸点为 1107℃, 两者很难同时以液相状态共存。从相图看出^[4], Mg 和 Fe 元素之间没有金属间化合物生成, 固溶度极低。目前国内外焊接镁/钢主要采用激光-GTAW 复合焊^[5]、电阻点焊^[6-7]和激光熔钎焊^[8-9]等熔焊方法。搅拌摩擦焊(friction stir welding, FSW)是一种新型固相连接技术, 在解决异种材料性能差异很大、焊接困难等方面具有很大优势, 是比较理想的异种材料连接方法^[10-12]。目前国外对镁/钢搅拌摩擦焊研究较少。ZHANG^[13]采用可回抽针对低碳钢和镁合金进行搅拌摩擦点焊; XIAO^[14]实现了采用搅拌摩擦无孔点焊对 AZ31B 镁合金和镀锌钢的搭接连接; WEI^[15]研究了带旋转切割销的搅拌针针对镁合金和 SUS302

钢搅拌摩擦搭接焊界面连接的影响。本文针对搅拌摩擦焊接工艺参数的选择与优化, 对镁/钢接头连接机理以及焊接进给速度和旋转速度对镁/钢接头界面组织和力学性能的影响进行研究。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

试验采用尺寸为 300 mm×75 mm×2.5 mm 的 AZ31B 镁合金板, 尺寸为 300 mm×75 mm×2 mm 的 DP600 高强钢板, 其化学成分见表 1。焊接之前, 将板材表面用砂纸打磨去除氧化层, 并用无水乙醇将板材清洗干净。焊接采用搭接焊接方式, 镁合金板置于钢板之上, 具体焊接示意图如图 1 所示。所有的焊接试样均通过 FSW-TS-S08 型搅拌摩擦焊机器进行, 搅拌头材质为钨铼合金, 形状为圆台带螺纹, 其中搅拌针长度为 2.8 mm, 宽度为 6 mm, 轴肩宽度为 15 mm, 搅拌头倾斜角度为 2°。

表 1 镁合金和钢化学成分

材料	$\omega_B/\%$							
	Mg	Fe	Zn	Al	Mn	Si	Cu	C
AZ31B	余量	—	1.1	3.3	0.3	0.02	0.04	—
DP600	—	余量	—	0.03	1.3	0.44	0.02	0.09

1.2 试验方法

在镁/钢搅拌摩擦搭接焊试验过程中, 下压量选用 0.1 mm, 焊接速率选用 80、120、160 mm/min,

[收稿日期] 2022-04-12

[基金项目] 中央引导地方科技发展专项(2019ZYD015)

[第一作者] 赵一帆(1997—), 男, 湖北武汉人, 湖北工业大学硕士研究生, 研究方向为镁/钢搅拌摩擦焊连接。

[通信作者] 胡心彬(1970—), 男, 湖北监利人, 湖北工业大学教授, 研究方向为车用轻质材料连接。

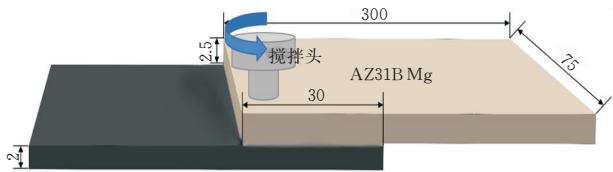


图 1 镁/钢搅拌摩擦搭接焊

旋转速率选用 600、900、1200 r/min。焊后通过电火花线切割机切取拉伸试样和金相试样，取样大小和位置见图 2 所示。用 CMT 型万能材料拉伸试验机和全自动显微维氏硬度计进行力学性能检测，取 3 组数据的平均值作为该工艺下的接头力学性能。金相试样经过镶嵌处理后，通过 400、800、1500、2000、3000 号砂纸打磨后机械抛光，对金相试样进行腐蚀处理，所选取钢侧腐蚀试剂为 4% 的硝酸酒精，腐蚀时间为 15 s，镁侧腐蚀试剂的成分配比为 6 g 苦味酸+10 mL 蒸馏水+10 mL 乙酸+100 mL 乙醇，腐蚀时间为 10 s。采用 GX51 型金相显微镜(OM)和扫描电子显微镜(SEM)分析接头焊缝区域的显微组织;采用能谱分析(EDS)以及 X 射线衍射仪(XRD)分析接头物相的组成。

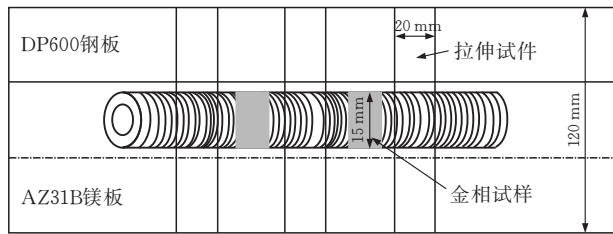


图 2 金相和拉伸试样截图位置

2 试验结果与分析

2.1 接头截面宏观形貌

图 3 为不同工艺参数下镁/钢搅拌摩擦搭接焊接头截面宏观形貌。可见 9 种工艺下接头的形貌各不相同，但是总体上接头呈碗状结构，主要差异在碗状结构两侧的 hook 结构形状大小，以及碗状结构深度。hook 结构的位置和形状大小影响着接头的有效搭接宽度(ELW)，从而影响搭接接头的力学性能。9 组工艺参数下 ELW 变化趋势见图 4。

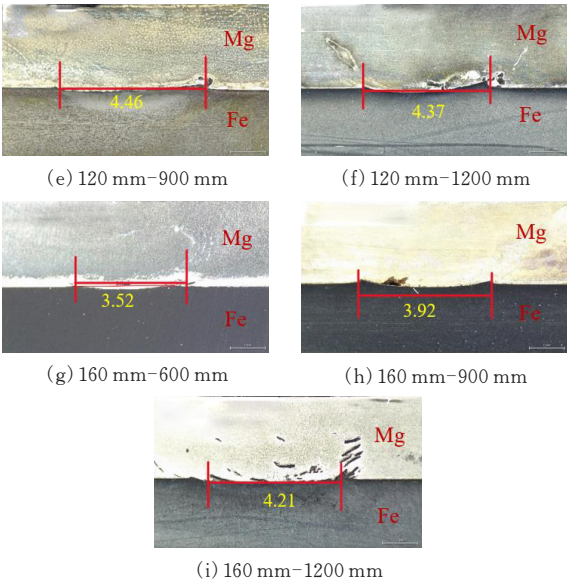
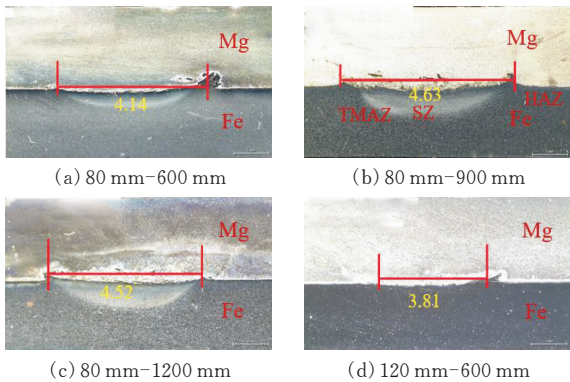


图 3 不同工艺参数接头横截面宏观形貌

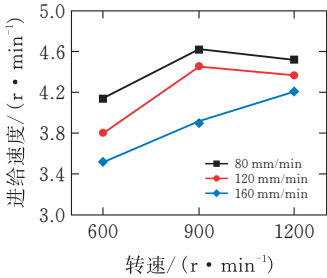


图 4 不同工艺参数下 ELW 变化趋势

可以看出，搭接接头后退侧 hook 结构一般较前进侧形状更小，因为随着焊接时搅拌针在旋转的过程中塑性钢受到搅拌针的旋转作用，在轴肩的压力作用下向上迁移，在后退侧更易嵌入塑性镁合金中，形成较为粗大的 hook 结构。同时由于搅拌针的作用，在搅拌区会有大小不一的少量钢粒通过搅拌针上的螺纹结构被带入镁合金侧，加强了接头部分区域的力学性能。由图 3a、d、g 可以看出，在旋转速度为 600 r/min 时，接头的 hook 结构和两种金属的嵌入深度不太明显，这是因为在较低的旋转速度下，搅拌头在焊接过程中对母材的热输入较小，塑性母材由于收到的热输入不够导致流动性减少，同时由于镁合金($144.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)的热导率高于高强钢($66.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)，大部分热量从镁合金侧散出，导致钢侧收到的热量减少，流动性变差，难以形成明显的 hook 结构。在旋转速度为 1200 r/min 时，接头的 ELW 相较于 900 r/min 变小，这是因为在焊接热输入较大时，高温下镁和钢的热膨胀系数差距较大，镁侧较大的形变压制了钢侧的形变，同时搅拌头的转速过大，搅拌针 for 塑性母材的粘带力减弱，导致 hook 结构的产生受到抑制。但是在进给速度为 160 mm/min 时有所差异，

这可能是在此进给速度下镁合金母材在旋转速度 900 r/min 收到的热输入还没有达到可以抑制钢侧形变的温度, 因此在旋转速度增大后, ELW 依然继续增加。在 3 组旋转速度下, 随着焊接进给速度的增大, 接头的 hook 结构的形状随之变小, 因为随着焊接进给速度的增加, 搅拌头在搅拌过程中与母材的接触时间减少, 热输入随之减少, 金属的流动性降低, 同时塑性母材收到搅拌针旋转作用的时间减少, 受到搅拌针旋转作用的钢变少, 形成的 hook 结构减小。

2.2 搭接接头微观组织分析

图 5 为进给速度 80 mm/min, 旋转速度 900 r/min 时接头钢侧金相显微组织形貌。其中, 图 5 分别为钢母材(BM)、热影响区(HAZ)、热机影响区(TMAZ)和搅拌区(SZ)。由图 5a、b 可以看出: 钢侧热影响区组织与母材组织相比变化不明显, 在热量的影响下, 有部分渗碳体析出, 但是晶粒的大小形状没有显著区别, 因此可知钢侧热影响区区域不明显。由图 5c 可以看出, 钢侧热机影响区晶粒呈现条状形貌; 相比于母材, 晶粒较为细小, 距离搅拌区越近, 晶粒细化程度越高(晶粒主要由铁素体和珠光体组成, 白色的为铁素体, 黑色的为珠光体)。由于在镁上钢下的搭接焊过程中, 焊接区域钢侧受搅拌针顶锻压力和热输入有限, 故热机影响区较小。由图 5d 可以看出, 钢侧搅拌区晶粒细化显著, 与热机影响区相比, 由更多的珠光体组成。

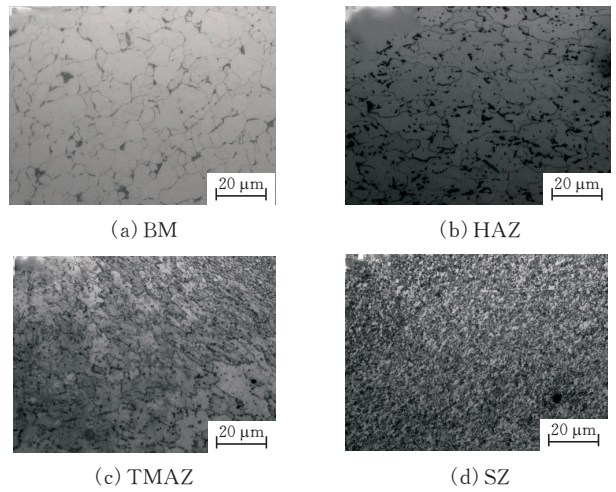


图 5 焊接接头钢侧微观结构

图 6 为不同旋转速度和进给速度时接头搅拌区钢侧金相显微组织形貌。可见, 焊核区高强钢晶粒在受到搅拌针旋转摩擦产生的热和剪切力的作用下, 部分晶粒被搅拌针搅碎并发生动态再结晶, 从而形成较小的晶粒, 双相钢中奥氏体相在热输入的影响下分解为铁素体和渗碳体, 铁素体和碳化物的有机结合形成珠光体; 焊核区钢侧主要由珠光体+

铁素体组成, 受到搅拌针产生晶粒细化的效果, 随着进给速度的减小, 晶粒细化的程度提高。这是因为进给速度减小, 搅拌针对母材钢晶粒的搅拌时间更长, 更多的晶粒被搅碎, 受到搅拌针的热输入更高, 产生的渗碳体含量也随之增加, 使接头的强度、硬度有所提升。由图 6a、d 可以看出, 在进给速度为 80 mm/min 条件下, 旋转速度为 1200 r/min 时组织成分含量与晶粒大小与 900 r/min 时差别不大, 但是与旋转速度 600 r/min 时相比, 晶粒大小明显减小。这是因为在较低转速下, 搅拌针对钢侧晶粒的搅拌作用不够充分, 晶粒搅碎的程度降低, 晶粒细化的效果减弱。

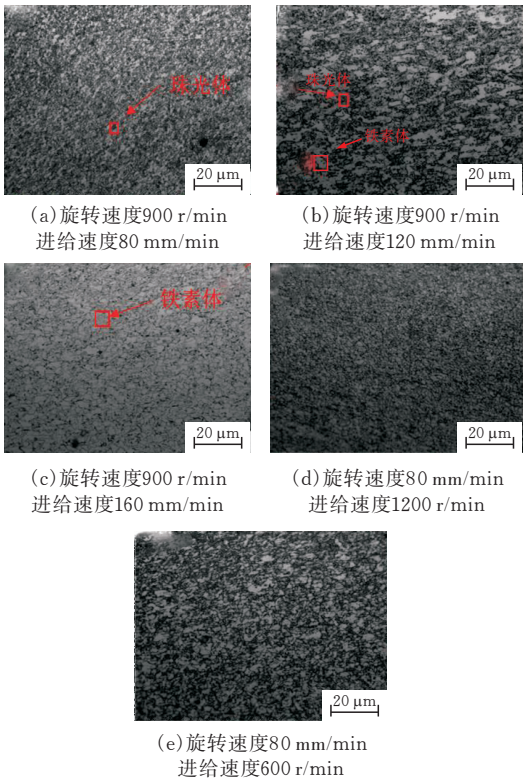


图 6 不同工艺下钢侧 SZ 微观结构

图 7 为在进给速度为 80 mm/min, 旋转速度为 900 r/min 的工艺参数下接头界面处不同区域 SEM 图。图中浅色区域为钢侧, 深色区域为镁侧。图 7a 为搅拌区中部界面处, 可见镁钢接头主要为互相嵌入的机械结合, 在界面处镁侧存在大小不一的钢粒, 呈现出焊接过程中钢的流动方向, 这是搅拌针上螺纹在搅拌时将钢侧部分基体带入到上层区域, 钢粒的存在使界面处镁侧区域的硬度得到一定的提升。图 7b、c 分别为搅拌区前进侧(AS)和后退侧(RS)两个 hook 结构, 可见后退侧与前进侧相比 hook 结构更为粗大, 并在 hook 结构周围伴随着大小不一的剪切钢带, 剪切钢带中伴随着细小钢粒, 钢粒随着搅拌针引起的塑性流线清晰明显。在前进侧剪切钢带较少, 这是因为前进侧焊缝金属与搅拌

头前进的方向相同，搅拌头与母材之间的作用力较小，形成的 hook 结构与塑性流动钢带较小。

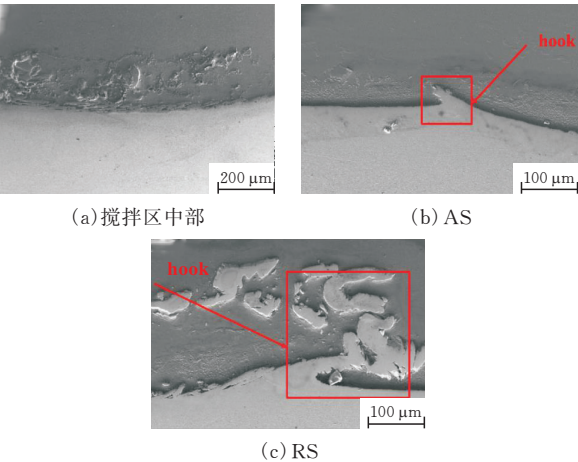


图 7 焊接接头界面处微观结构

图 8 为搭接接头界面处几种经典的搭接机械结合形式 SEM 图。由图 8 可以看出界面处镁钢通过锯齿结构、Z 型结构和楔形结构等互相紧密的机械结合，说明镁钢搭接接头除了搅拌区前进侧和后退侧形成的 hook 结构使两种金属互相嵌入之外，在搅拌区同时存在微观不同尺寸的机械结合结构。同时可以观察到，搅拌区中心线左右两侧的机械咬合结构齿尖朝向相反，这是因为搅拌针在焊接搅拌过程中以中心线为基准，前进侧和返回侧与金属之间相互摩擦方向相反，由此使得母材的流动方向不同形成方向相反的齿尖，使接头在不同方向都存在良好的力学性能。图 9 量化了在不同尺寸的典型微观机械咬合结构，其纵向高度在几 μm 到数 $10\ \mu\text{m}$ ，与 mm 级的 hook 结构共同综合提升了接头的力学性能。

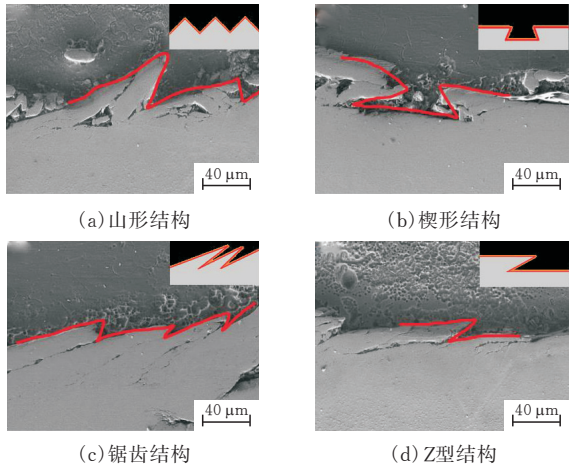


图 8 典型的机械结合结构

图 10a、b 分别为接头搅拌区近 hook 结构和中部界面处元素线分析图。整个元素线分析图分为 A、B 和 C 三个区域。区域 A 为界面镁侧区域，区域 B 为界面镁钢过度区域，区域 C 为界面钢侧区域。

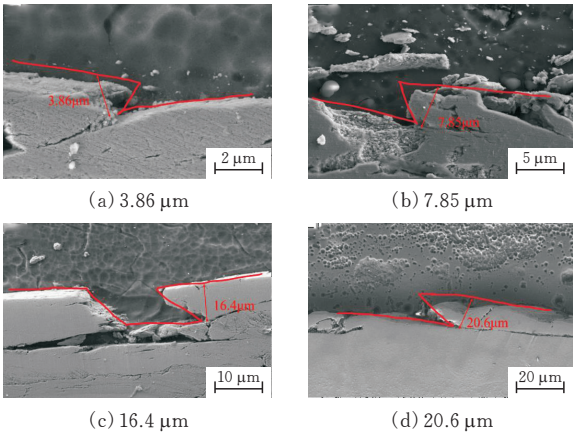


图 9 不同尺寸微观机械咬合结构

从图可以看出，区域 A 中 Fe 元素含量逐渐降低至零，说明在界面镁侧区域没有 Fe 元素的扩散，图 10b1 中 A 区域处出现 Fe 元素含量骤升，这是在焊接过程中搅拌针螺纹将部分小钢粒带到上层区域所致。区域 B 中同时包含 Mg 和 Fe 元素，是接头界面的过度区域。此区域 Mg 元素由于母材的互相嵌合，部分 Mg 元素被包含于细小钢粒之中，出现在总体呈现逐渐减少时的反弹现象，Fe 元素含量逐渐上升。图 10a 中 $44\ \mu\text{m}$ 处，Mg 有一段少的上升，与大量 Fe 共存，这说明在界面极少量 Mg 向 Fe 侧的扩散。图 10b1 中 $38\ \mu\text{m}$ 处，Fe 大量存在时，Mg 也存在与 10a 相同的共存现象，说明镁/钢界面处存在 Mg 向 Fe 侧 $1\sim2\ \mu\text{m}$ 的短程扩散。区域 C 中，图 10b1 中 Mg 和 Fe 元素含量都存在波动现象，但在 Mg 含量增加处，Fe 含量相应减少，Fe 含量增加处，Mg 含量相应减少，这是因为此处的锯齿状结构使镁/钢母材互相咬合，而不是两种元素的相互扩散。

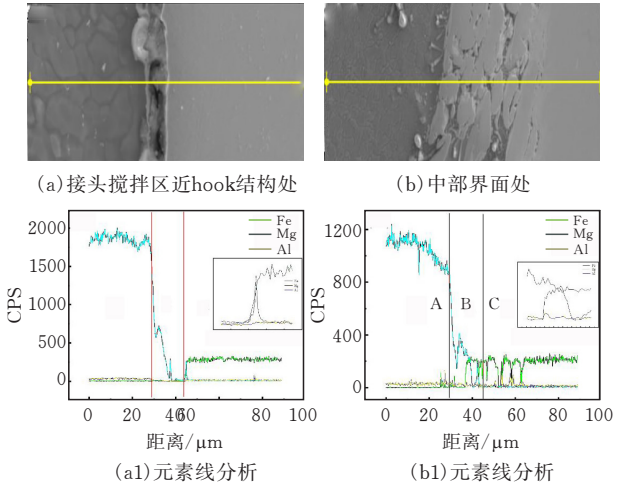


图 10 界面线扫描结果及元素线分析

通过线扫描分析，Mg 和 Fe 元素大部分相互独立存在，没有形成化合物的现象，只有在过度区钢侧会有极少量的 Mg 元素扩散，说明在镁钢搅拌摩

擦搭接焊中, 镁钢接头的连接主要为机械结合。为了确定接头 Fe 和 Mg 元素分布, 对镁/钢界面进行了元素面扫描分析, 分析结果见图 11。

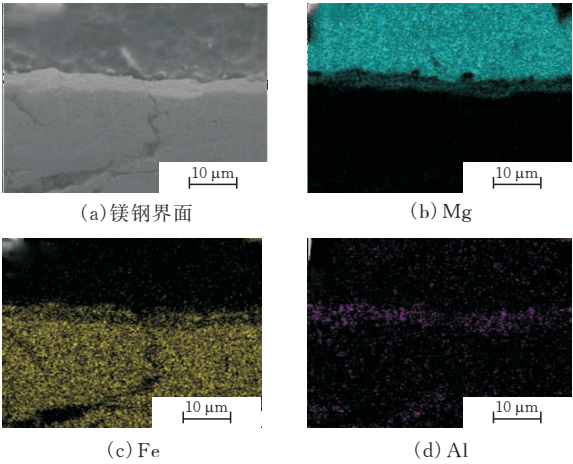


图 11 接头面扫描结果

图中显示镁/钢界面明显, 在 Mg 侧几乎不存在 Fe 元素, 而在 Fe 侧存在极少量的 Mg 元素, 同时在界面分界处, 出现了 Al 元素的富集现象。这可能是镁合金中的 Al 元素向钢侧扩散, 由于 Fe-Al 金属间化合物吉布斯自由能极低, 在焊接过程中容易形成该种现象, 但是总体上 Mg 和 Fe 分界分明, 相互独立存在, 证明了镁钢搭接接头的连接形式主要为机械结合。

图 12 为镁/钢搭接接头搅拌区界面处 XRD 结果。图中可以看出, 在接头界面处主要存在 Fe、Mg 两相, 由于 Mg 极易氧化, 接头中还存在部分焊接过程中形成的 MgO 杂质。这进一步说明在镁/钢搅拌摩擦搭接焊中, 两者的连接形式主要为机械结合。

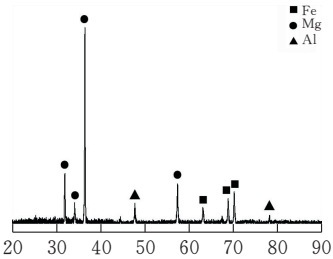


图 12 接头界面 XRD 结果

3 接头力学性能分析

图 13 是在不同焊接工艺下接头的最大拉剪破坏载荷。拉伸结果表明, 焊接进给速度为 80 mm/min 时, 接头试样的剪切强度优于进给速度较高时的试样, 这是因为在焊接过程中搅拌头搅拌程度是影响接头质量的重要因素。在焊接过程中, 搅拌头前进时轴肩产生的剪切力与搅拌针高速旋转时与母材之间的摩擦, 使塑性金属在焊核区域流动结合,

搅拌针上的螺纹结构在旋转时将底层金属带入上层, 塑性金属冷却后互相嵌合, 形成紧密的机械咬合结构。因此, 在较低进给速度的工艺参数下, 搅拌头与焊接金属接触时间更长, 搅拌针与母材之间有更充分的摩擦过程, 搅拌区塑性状态的金属流动性更强, 形成较好的机械结合。拉伸试样在相同的进给速度下, 随着旋转速度的提升, 剪切强度出现先增加后减小的趋势。旋转速度为 600 r/min 时, 由于低旋转速度的热输入不够, 母材金属未能达到最佳的塑性状态, 流动性较差, 两者的结合程度不高, 因此出现了拉伸性能较差的现象; 旋转速度为 1200 r/min 时, 由于高转速带来的大量热输入, 镁金属的线胀系数为 $25.8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, 铁金属的线胀系数为 $11.76 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, 两者相差较大^[16], 导致两种金属在高热量下结合接头内应力较大, 使接头的拉伸性能出现降低的现象。旋转速度为 900 r/min 时表现出最佳的性能强度, 即平均为 295.8 N/mm。

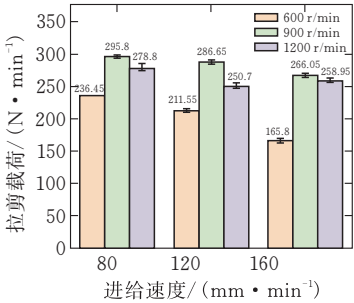


图 13 不同工艺参数下焊接接头力学性能

图 14 为在旋转速度 900 r/min 下不同焊接进给速度的接头界面两侧显微硬度。接头试样在不同旋转速度下显微硬度分布趋势基本相同, 没有显著差别。因此采用剪切强度最大(即焊接进给速度为 80 mm/min)的接头试样进行镁钢搭接接头的显微硬度分析。

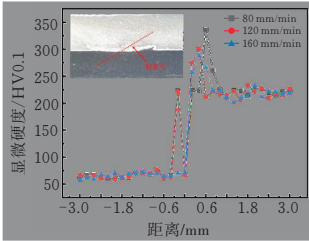


图 14 焊接接头显微硬度

由图 14 可知, 接头两侧的硬度整体不均匀: 搅拌区底部钢侧硬度较高, 平均约 220 HV_{0.1}, 上层镁侧硬度较低, 平均约 65 HV_{0.1}, 中部界面处硬度波动幅度较大, 这主要是由于此区域组织成分不均匀, 同时存在镁钢基体, 搅拌过程中搅拌针带至上层的钢粒分布在镁侧, 因此在界面处离钢侧越近,

硬度波动幅度越大。在钢侧搅拌区,由于搅拌针的热输入与机械搅动产生的晶粒细化效果显著,使进给速度为 80 mm/min 部分区域的硬度增加达到最大值约为 340 HV_{0.1}。

4 结 论

1)焊接进给速度为 80 mm/min,旋转速度为 900 r/min 的工艺参数下,焊接接头成型效果最好。搭接接头连接区域呈钳形,在其他参数一定时,焊接区有效搭接高度随着进给速度的增加而减小,随着旋转速度的增加呈现先增大后减小的趋势。

2)在镁/钢搅拌摩擦搭接焊接头中,检测出 Fe、Mg 及 MgO 等物相衍射峰,接头中存在氧化物夹杂,在连接形式上主要为机械结合,并存在 Mg 向 Fe 侧的短程扩散。接头钢侧搅拌区出现晶粒的明显细化,热机影响区较小。各区域主要由铁素体+珠光体组成,镁侧搅拌区晶粒受搅拌头的机械力及热输入的影响,晶粒较母材有一定程度的细化。

3)钢侧硬度与母材接近,在靠近界面处的搅拌区及热机影响区由于晶粒的细化而上升,最高达到 340 HV_{0.1}。界面处硬度分布由于组织成分的变化出现均匀度较低的现象。搭接接头拉伸性能在其他参数一定时,随着进给速度的增加逐渐降低,随着旋转速度的增加呈现先增大后减小的趋势,在进给速度为 80 mm/min,旋转速度为 900 r/min 的工艺参数下达到最高的拉伸性能,即 295.8 N/mm。

[参 考 文 献]

[1] 唐靖林. 镁合金在汽车轻量化应用中的问题与建议[J]. 汽车工艺师, 2021(Z1): 27-31.

[2] 史东杰, 王连波, 刘对宾, 等. 汽车底盘轻量化材料和工艺[J]. 热加工工艺, 2016, 45(03): 16-18.

[3] 杨玲玲, 赵博宁, 潘杰花. 汽车发动机用 AZ31 镁合金的合金化与热处理行为研究[J]. 铸造技术, 2016, 37(06): 1126-1129.

[4] 齐晓冬. 基于夹层设计的镁合金与钢、铝合金激光-TIG 复合焊接研究[D]. 大连:大连理工大学, 2011.

[5] SONG G, YU J, LI T, et al. Effect of laser-GTAW hybrid welding heat input on the performance of Mg/Steel butt joint[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 31: 131-138.

[6] MANLADAN S M, YUSOF F, RAMESH S, et al. Microstructure and mechanical properties of resistance spot welded in welding-brazing mode and resistance element welded magnesium alloy/austenitic stainless steel joints[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 250: 45-54.

[7] LIU L, XIAO L, FENG J C, et al. The mechanisms of resistance spot welding of magnesium to steel[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2010, 41(10): 2651-2661.

[8] NASIRI A M, WECKMAN D C, ZHOU Y. Interfacial Microstructure of Laser Brazed AZ31B Magnesium to Sn-Plated Steel Sheet[J]. Welding Journal, 2015, 94(03): 61S-72S.

[9] NASIRI A M, LEE M Y, WECKMAN D C, et al. Effects of interfacial lattice mismatching on wetting of ni-plated steel by magnesium[J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 2014, 45(12): 5749-5766.

[10] 甘伟. 汽车轻量化新型镁合金的搅拌摩擦加工改性研究[J]. 热加工工艺, 2017, 46(06): 49-51.

[11] MAO Y Q, YANG P, KE L M, et al. Microstructure evolution and recrystallization behavior of friction stir welded thick Al—Mg—Zn—Cu alloys: influence of pin centerline deviation[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2022, 35(05): 745-756.

[12] YANG P, MAO Y, XU Y, et al. Interface characteristics, microstructure, and mechanical properties of friction stir lap welded dissimilar Al/Mg alloy joints: effect of pin-tip profile[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 119: 5251-5260.

[13] ZHANG Z K, WANG X J, WANG P C, et al. Friction stir keyholeless spot welding of AZ31 Mg alloy-mild steel[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(06): 1709-1716.

[14] XIAO L, XIJING W, BOSHI W, et al. The role of mechanical connection during friction stir keyholeless spot welding joints of dissimilar materials[J]. Metals-Open Access Metallurgy Journal, 2017, 7(06): 217.

[15] WEI Y, LI J, XIONG J, et al. Microstructures and mechanical properties of magnesium alloy and stainless steel weld-joint made by friction stir lap welding[J]. Materials & design, 2012, 33: 111-114.

[16] 谭哲. 双相钢/镁合金添加 Sn 箔激光焊接头连接机理研究[D]. 长沙:湖南大学, 2016.