

引文格式: 栗卓新, 张冬妮, 言奇株, 等. 异种材料激光焊接中金属间化合物形成机理及控制的研究进展, 2021, 64(15): 14-23.

LI Zhuoxin, ZHANG Dongni, YAN Qizhu, et al. Research progress on formation and control of intermetallic compounds in laser welding of dissimilar materials[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(15): 14-23.

# 异种材料激光焊接中金属间化合物形成机理及控制的研究进展\*

栗卓新<sup>1</sup>, 张冬妮<sup>1</sup>, 言奇株<sup>1</sup>, 张禹<sup>1</sup>, 韩祎<sup>1</sup>, Erika Hodúlová<sup>2</sup>, 魏伟<sup>3</sup>, 李红<sup>1</sup>

(1. 北京工业大学, 北京 100124;

2. 斯洛伐克工业大学, 特尔纳瓦 91724;

3. 天津阿麦特工程技术有限公司烟台生产基地, 烟台 264006)

[摘要] 综述了铝/钢、钛/钢、镁/铝和 NiTi 形状记忆合金/不锈钢异种金属激光焊接接头中金属间化合物的形成机理及控制措施的研究进展。分析了不同母材成分以及不同焊接工艺对接头金属间化合物的影响。通过添加中间填料、控制热输入和采取复合焊接工艺等方式可以对金属间化合物实现有效控制, 从而优化焊接接头组织, 提升力学性能。介绍了材料计算学在模拟和预测异种金属激光焊接接头金属间化合物结构和性能方面的研究进展。

关键词: 异种金属; 激光焊接; 金属间化合物; 计算模拟; 组织性能

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2021.15.014



栗卓新

教授, 主要研究方向为基于统计分析的焊接冶金与材料优化设计及质量控制, 轻金属的精密连接, 纳米热喷涂等。

激光焊具有能量密度高、焊接速度快、焊缝窄、热影响区小、焊接变形小、可焊材料范围广、与其他焊接方法兼容性强等优点<sup>[1-2]</sup>, 不仅在航空航天、医疗器械、3C 产品和电池等领域的异种金属精密微器件中应用广泛, 在玻璃、陶瓷、半导体单晶硅和有机聚合物等非金属-金属的异种材料连接和封装方面也展现出独特的优势<sup>[3-4]</sup>。

异种金属激光焊接中, 被焊材料物理和化学性质的差异是影响焊接成形质量的关键因素。激光焊接输入能量高, 焊接速度快, 焊缝成形快, 一定程度上缓解了异种母材性能差异导致的偏析问题, 并且也有抑

制焊缝金属间化合物 (Intermetallic compound, IMC) 生长的效果<sup>[5]</sup>。在非平衡凝固条件下 (热循环速率极高), 金属间化合物生长动力学问题仍是大多数异种材料激光焊接的重要研究方向。金属间化合物可分为 3 类<sup>[6]</sup>: 金属键化合物、金属键和共价键化合物、离子键和 (或) 共价键化合物。不同的键合模式影响了化合物的力学性能。非金属键成分和晶界脆性会导致金属间化合物的脆性, 从而影响焊材性能<sup>[7]</sup>。目前有效控制焊缝金属间化合物的工艺手段主要为添加中间层或采取焊后热处理。随着应用于焊接的材料体系日益复杂, 对异种材料激光焊接接头组

\* 基金项目: 科技部中国-波兰政府间科技合作委员会第 38 届例会人员交流项目 (No.13); 先进焊接与连接国家重点实验室开放课题研究基金项目 (AWJ-20-M01); 新型钎焊材料与技术国家重点实验室开放课题 (SKLABFMT 202004); 2021 年度北京工业大学国际科研合作种子基金项目 (A14); 2020 年北京市大学生科研训练计划深化项目。

织和性能的研究正在从传统的“试错法”工艺试验向计算材料学理论研究方向发展。计算材料学可以处理复杂的多元化问题,目前已有不少学者采用第一性原理<sup>[8]</sup>和分子动力学<sup>[9]</sup>计算模拟等方法对焊缝金属间化合物和接头性能进行了预测,以达到优化材料和工艺的目的。

本文主要介绍了铝/钢、钛/钢、镁/铝以及 NiTi 形状记忆合金(Shape memory alloy, SMA)/不锈钢异种材料激光焊接工艺,分析了中间层填料成分对焊缝金属间化合物生长的影响,以及采用模拟计算方法分析接头金属间化合物的国内外最新研究进展。

### 激光焊接工艺对异种材料接头金属间化合物生长的影响

异种材料激光焊中金属间化合物所导致的接头脆化是亟待解决的问题。对金属间化合物的控制可以从能量和冶金两个方面入手<sup>[10]</sup>,其中能量控制的主要途径包括调节激光工艺参数和激光器偏置,冶金控制可以通过加入中间填料或焊后热处理来实现。

#### (1) 添加中间填料。

母材之间热力学性能参数差异较大,焊接过程中易产生硬脆金属间化合物,致使接头有较大的残余应力,韧性较差<sup>[11]</sup>。中间层的加入能够有效解决两者不固溶、形成脆性金属间化合物的难题<sup>[12-14]</sup>。很多学者采用不同形态的中间层(粉末、箔带、纳米多层膜等)来控制材料的微观结构。中间层填料的元素除了可以起到细化晶粒的作用,还可以通过参与熔池反应“稀释”母材中元素,减少金属间化合物生成的数量。当填料为箔带类时,还可作为物理和化学屏障来减缓母材之间的差异<sup>[15]</sup>,控制材料的微观结构,减少或避免母材之间的反应,达到提升接头力学性能的目的<sup>[16-17]</sup>。中间层的选择除了要自身与母材的性质以外,中间层

的厚度也是十分重要的参数<sup>[11]</sup>。

#### (2) 控制热输入。

由于异种金属母材的各项性能差异导致激光焊接接头中产生金属间化合物,金属间化合物通常表现为脆硬相,导致接头的硬度远高于母材,还极有可能产生裂纹。在激光焊接中,热输入是对焊缝影响最大、也是最可控的参数之一,合理调控热输入可以改善焊缝的化学成分、不同母材的稀释率以及降低接头缺陷的形成。由于熔池几何形状的变化取决于冷却速度,冷却速度与温度的平方成反比<sup>[16]</sup>,因此改变热输入量会引起温度的变化从而改变焊缝形状<sup>[18]</sup>。限制熔池的大小和范围,可以实现对金属间化合物层的控制<sup>[19]</sup>。

#### (3) 焊后热处理。

利用金属间化合物不同温度下组织转变的特性,对接头采取适当的热处理,改变相结构,从而改善力学性能。例如 DO<sub>3</sub> 型结构的 Fe<sub>3</sub>Al 金属间化合物,在 540℃ 以上采用适当的热处理工艺后变成了 B2 型结构的有序组织<sup>[6]</sup>。

#### (4) 外加能量场。

在激光焊接过程中还可以借助多能场复合来优化接头性能。如激光振荡磁场复合<sup>[17]</sup>、激光-电弧复合<sup>[20-22]</sup>、激光-超声 MIG (Metal inert gas welding) 复合<sup>[23]</sup>、激光-FSW (Friction stir welding)<sup>[24-25]</sup> 和激光-TIG (Tungsten inert gas welding)<sup>[26]</sup> 等。

### 1 激光焊接工艺对钢/铝异种接头金属间化合物生长的影响

王晓虹<sup>[27]</sup>采用“钢上铝下”的搭接形式进行焊接,分别采用 Fe-B-Si、Cu、Al-Cu-Re 作为中间层。结果表明,无中间层时,钢侧会生成富铁金属间化合物,铝侧会生成富铝金属间化合物。焊缝中的金属间化合物有 FeAl、FeAl<sub>2</sub>、Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>、FeAl<sub>3</sub>。加入中间层的接头中富铝金属间化合物的厚度和数量都有所减少,且焊缝中心处的硬度值下降。

张文超<sup>[28]</sup>也采用“钢上铝下”进行搭接激光焊。试验中由于穿透深度不同,熔池区上、下部分的组织也不同,但获得了相同种类的界面金属间化合物。在激光熔深焊模式中,随着熔池穿透深度的增加,界面 IMC 厚度增加但物相不变(靠近铝侧为 FeAl<sub>3</sub>,靠近熔池侧为 Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>),熔池区组织逐渐变化。当穿透深度小于 217μm 时,组织为铝在 α-Fe 中形成的固溶体组织;穿透深度为 344μm 时,熔池区上部依旧是铝在 α-Fe 中形成的固溶体组织,下部为 Fe<sub>3</sub>Al;穿透深度为 478μm 时,熔池区上、下部分分别为 Fe<sub>3</sub>Al、FeAl。在激光热导焊模式中,随着热输入增加,针状 FeAl<sub>3</sub> 相随之增加,但层状的 Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub> 相厚度几乎不变。分析为先生成 Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub> 相,随后冷却过程中逐渐析出 FeAl<sub>3</sub> 相。

Mohammadpour 等<sup>[29]</sup>采用双光束激光熔钎焊工艺对镀锌钢和 Al6022 铝合金进行连接。发现双光束激光成形和高扫描速度可使 IMC 的厚度控制在 3μm 左右。通过改变激光束模式实现接头失效位置的改变。在双横梁模式下,试样在铝一侧断裂。而在双列直插光束模式下,断裂发生在钢一侧。图 1<sup>[29]</sup>为焊接接头中不同位置的金属间化合物层分布情况。熔融填丝在钢表面的润湿时间小于 1s,不足以使 IMC 生长。因此,除了填充焊丝的作用,集中的热量输入和高扫描速度导致的高冷却速率限制了基于扩散控制的 IMC 的生长速率。

Filliard 等<sup>[30]</sup>使用 ER4043-AlSi<sub>5</sub> 焊丝,对 AA6016-T4 铝合金和 DX56D+Z140M 钢板进行激光钎焊。分析了 Fe-Al 界面形成的金属间化合物层,测量了每种结构金属间化合物层的最大厚度,见图 2<sup>[30]</sup>和图 3<sup>[30]</sup>,图 2 为接头横截面的光学显微镜图。不同厚度的金属间化合物层均表现出特定的微观结构和晶体取向,薄金属间化合物层的晶粒较细小,厚金

属间化合物层的晶粒较粗大。在不使用焊剂的情况下,高的钎焊速度更易获得具有薄金属间化合物层的高强度接头。

综上所述,在钢/铝异种激光焊中采用含 Al/Fe 元素的混合中间层有助于降低接头硬度及金属间化合物的数量和厚度。激光焊接接头中生成较薄的金属间化合物层有助于提高焊接接头的强度。其他条件一定时,高的激光功率会导致金属间化

合物层厚度增加,而采用适当的中间层作为焊料时可以减少金属间化合物的数量和厚度。除此之外,高的激光扫描速度有助于减小和控制金属间化合物层的厚度。

## 2 激光焊接工艺对钛/钢异种接头金属间化合物生长的影响

在钛/不锈钢异种焊接中,母材的物理化学性能差异大导致了焊接的一系列问题。如钛的热导率仅为铁的 1/5,因此焊缝两侧母材热输入

产生巨大差异,两侧母材对焊缝的稀释率不同也影响熔池中的冶金反应。焊接过程中还可能因为钛铁熔点的差异(钛的熔点为 1677℃,铁的熔点为 1537℃)出现铁熔化而钛未熔化的情况,铁熔化后开始扩散,导致了铁元素的流失、合金元素烧损或蒸发。根据钛-铁二元相图可知,随着 Fe 含量的增加逐渐形成一些相,包括  $\alpha$ -Ti、 $\beta$ -Ti、FeTi (BCC)、Fe<sub>2</sub>Ti ( $\lambda$ -BCC) 和  $\alpha$ -Fe。常温下铁在  $\alpha$ -Ti 中几乎不溶,在  $\beta$ -Ti 中溶解度较高,所以在冷却过程中会产生金属间化合物 TiFe、TiFe<sub>2</sub> 和 Ti<sub>2</sub>Fe。除此之外,钛极易与碳生成脆性相 TiC,致使接头硬脆性升高。因此在钛/钢异种合金焊接中控制金属间化合物的形成是提升接头性能的关键。

学者们探究了激光焊不同中间填料、焊接方式对拉伸性能的影响<sup>[31-43]</sup>,其结果如图 4<sup>[44]</sup>所示。其中 Zhang 等<sup>[42]</sup>研究了以 Cu 片作为中间层的 TC4 钛合金/SUS301L 不锈钢脉冲激光焊,试验结果表明,焊缝中形成的 Cu 固溶体、Cu<sub>2</sub>Ti、CuTi 和 CuTi<sub>2</sub> 有助于降低 Ti-Fe 金属间化合物的含量,并且铜的固溶体在焊缝中呈弥散分布,降低了 Ti-Fe 和 Ti-Cu 金属间化合物的脆性;焊缝成分和显微组织的不均匀性导致了硬度分布不均匀;接

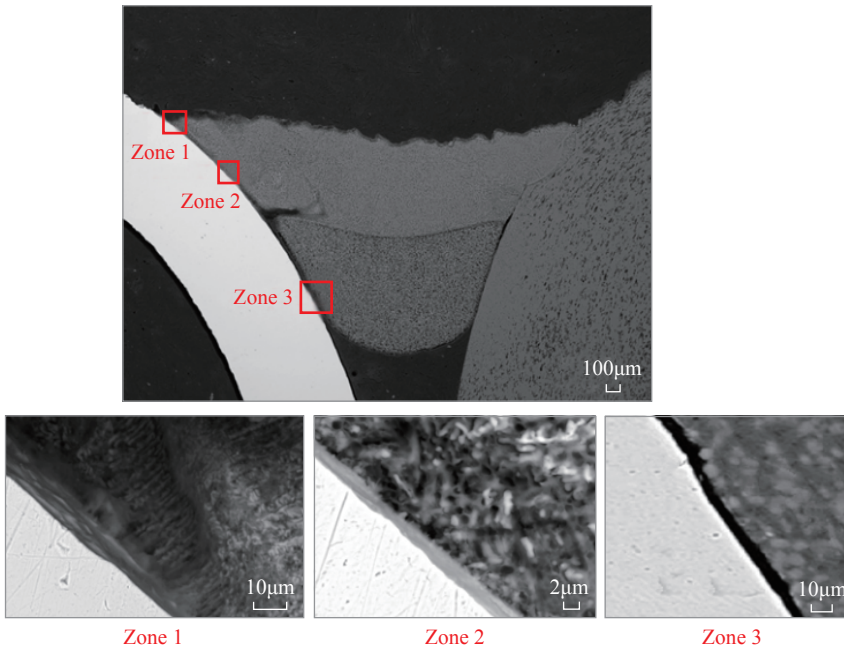


图1 焊缝中不同位置的 IMC 厚度  
Fig.1 IMC thickness at different positions in weld

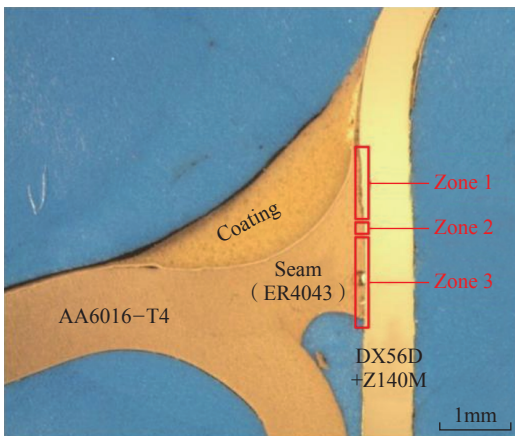


图2 焊缝界面处金属间化合物层的 3 个区域  
Fig.2 Three areas of intermetallic compound layer at weld interface

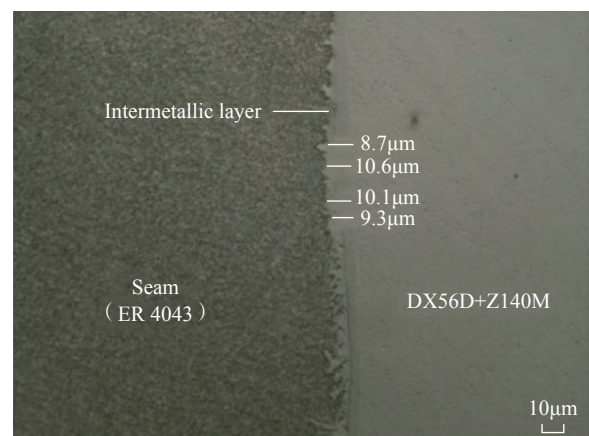


图3 用光学显微镜测量金属间化合物层的最大厚度  
Fig.3 Measuring maximum thickness of intermetallic compound layer with an optical microscope

头的平均抗拉强度为 350MPa,所有拉伸试样均在靠近 TC4 钛合金侧焊缝处的 CuTi<sub>2</sub> 层断裂。

Gao 等<sup>[44]</sup> 研究发现 Ti<sub>x</sub>Ni<sub>y</sub>、Ti-Cr 和 Ti-Fe 脆性金属间化合物的形成严重影响了 Ti6Al4V 与 Inconel718 焊接接头的性能。以 Nb 作为中间层,采用脉冲激光焊接诱导共晶反应,当激光束位于 Ti6Al4V-Nb 界面时,通过原子互扩散和共晶反应形成了 Nb-Inconel 718 的界面连接。在焊缝中未观察到 Ti<sub>x</sub>Ni<sub>y</sub>、Ti-Cr 或 Ti-Fe 金属间化合物,表明未熔化的 Nb 中间层在母材之间起到扩散阻隔层的作用。在 Nb-Inconel 718 界面上形成的共晶反应层与 Ni-Nb 系金属间化合物的主要显微组织有关。焊接接头在最大抗拉强度 145MPa 时在反应层处断裂,断裂形式为解理断裂。

吕攀<sup>[45]</sup> 研究了纯钛与 304 不锈钢的激光焊接。发现直接焊接的接头产生了大量的 Ti-Fe 金属间化合物。当采取激光束偏置(偏向 304SS)时,接头性能有所优化。分别采用 V、

Cu、Cu-V 中间层进行激光焊接,结果表明,这 3 种中间层的添加有效抑制了 Ti-Fe 金属间化合物的形成,提高了接头的力学性能。

杨胜等<sup>[46]</sup> 采用 Cu 为中间层激光焊接 TC4 钛合金和 316L 不锈钢。研究表明, Cu 中间层能够有效抑制界面脆性 Ti-Fe 金属间化合物的产生。TC4 钛合金与焊缝界面显微组织主要为连续的 Ti-Fe 化合物层和非连续的 Ti-Fe、Ti-Cu 化合物层。随后进行有限元数值分析的结果表明,在焊缝处接头的米塞斯应力值最大。

在 Zhang 等<sup>[47]</sup> 的研究中,以钛/不锈钢为母材,采用 Nb 作为中间层。为了防止钛和铁的混合,在 Ti-Nb 侧采用熔焊。焊缝 Ti 侧的 Nb 没有形成任何金属间化合物,而不锈钢一侧保持未熔化。在不锈钢一侧, Fe 和 Nb 相互扩散,最终反应层由 Nb/Fe<sub>7</sub>Nb<sub>6</sub>/Fe<sub>2</sub>Nb+α-Fe 共晶组织/α-Fe/SS 相组成。而后 Zhang 等<sup>[48]</sup> 又进行了熔化 Nb-不锈钢侧的双道焊试验,发现在熔池中产生了 γ-Fe 和

Fe<sub>2</sub>Nb,焊缝中的金属间化合物导致了裂纹的产生。

综上研究,在钛/不锈钢激光异种焊接接头中金属间化合物主要与 Ti 有关。通过添加 Cu、Nb 等中间层可以有效抑制金属间化合物的生成,同时从物理上阻隔扩散作用。激光偏置向不锈钢一侧有助于减少钛元素的参与,从而减少含 Ti 金属间化合物的产生。

### 3 激光焊接工艺对镁/铝异种接头金属间化合物生长的影响

镁和铝的熔点都较低(镁熔点为 651℃,铝熔点为 660℃),激光焊接过程中容易发生元素烧损和蒸发现象,且常伴随强烈的金属汽化和等离子体产生,导致熔池剧烈运动而无法获得良好的接头。镁和铝元素都非常活泼,极易生成氧化膜且热膨胀系数大,这些属性导致焊后变形严重。镁和铝的晶体结构差异导致彼此的互溶度很低,因此不易形成焊缝熔合区<sup>[49]</sup>。除此之外,接头中容易形成脆性 Mg-Al 金属间化合物以及未熔合、夹杂、裂纹、气孔等缺陷<sup>[50-56]</sup>。

麻丁龙等<sup>[57]</sup> 选择 Zn 作为中间层,使用光纤激光器对 AZ31B 镁合金和 5083 铝合金进行焊接。结果表明,焊后组织较为均匀,热影响区不明显。镁一侧及焊缝中心以 α-Mg 和 α-Mg+Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 共晶组织为主,底部为 Al 固溶体和 Mg-Al, Mg-Zn 金属间化合物组成的混合组织。随着 Zn 中间层厚度的增加,焊缝底部生成的 Mg-Zn 增多, Mg-Al 金属间化合物数量减少,且连续分布的状态有所改善,接头断裂模式由解理断裂逐渐向混合断裂方式转变。当中间层厚度为 0.1mm 时,接头剪切强度达到最大值。

戴军等<sup>[58]</sup> 选择 TiB<sub>2</sub> 作为中间层,使用脉冲激光器进行了 AZ31 镁合金和铝基复合材料的焊接。结果表明,添加 TiB<sub>2</sub> 增强了熔池的流动性,观察到焊缝中存在 Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>、

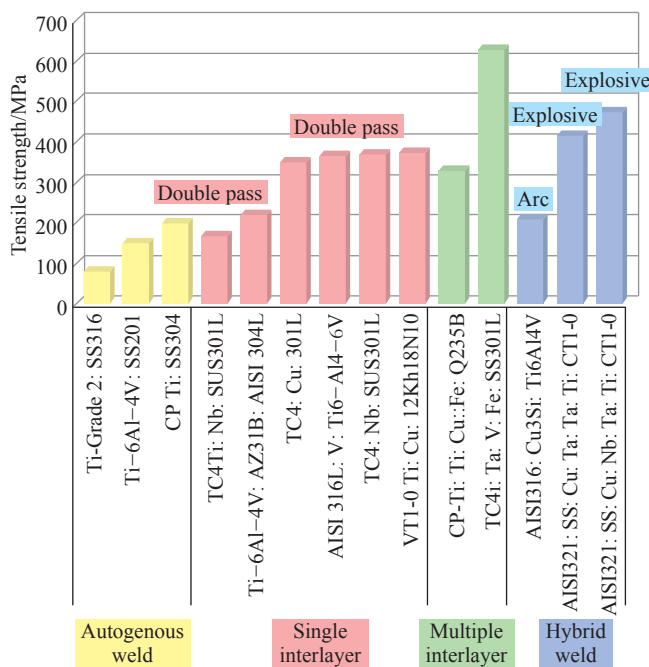


图 4 钛/钢异种金属激光焊接工艺对拉伸性能的影响

Fig.4 Effect of laser welding process of Ti/steel dissimilar metal on tensile properties

AlMg、Al<sub>3</sub>Ti 等金属间化合物, TiB<sub>2</sub> 的加入抑制了 Al-Mg 化合物的生成。

#### 4 激光焊接工艺对 NiTi 形状记忆合金/不锈钢异种接头金属间化合物生长的影响

Quintino 等<sup>[59]</sup>研究了 NiTi 合金和不锈钢激光异种搭接焊中母材搭接顺序以及中间层厚度对焊缝的影响。结果表明,当 NiTi 合金在上不锈钢在下时,不锈钢熔化量很少,焊缝中产生大量裂纹。当不锈钢在上 NiTi 合金在下时, NiTi 合金熔化量相对较多,焊缝熔宽增加且裂纹明显减少。添加 Ni 中间层后焊缝裂纹明显受到抑制。Pouquet 等<sup>[60]</sup>的研究中,采取相似的试验方法,发现降低激光频率和增加激光功率可以有效提高接头的机械强度。

Shamsolhodaei 等<sup>[61]</sup>研究了 NiTi-316L 不锈钢异种焊接接头的组织及力学性能。分别采用了 3 种焊接方式:(1)激光束位于中心线上;(2)激光束偏向不锈钢侧 100 $\mu$ m;(3)激光束位于中心线上并添加 50 $\mu$ m 厚的 Ni 中间层。结果表明,激光束位于中心线上,焊接区内形成了大量的脆性金属间化合物(如 Fe<sub>2</sub>Ti、Cr<sub>2</sub>Ti 和 Ti<sub>2</sub>Ni)。加入 Ni 中间层后焊缝金属间化合物减少,但焊接区内主要形成富 Ni 金属间化合物(Fe<sub>3</sub>Ni 和 Ni<sub>3</sub>Ti)。通过激光偏置和加入 Ni 中间层,都可以抑制高硬度的极脆金属间化合物的生成,改变其在焊接区内的分布,从而提高接头力学性能。

Asadi 等<sup>[62]</sup>研究了焊后退火对 NiTi/奥氏体不锈钢激光焊接接头组织及力学性能的影响。结果表明,100 $^{\circ}$ C 退火对接头的组织和力学性能没有影响,200 $^{\circ}$ C 进行焊后热处理后,接头的抗拉强度提高了 1.91 倍。此外,在 300 $^{\circ}$ C 热处理期间,金属间化合物(Cr<sub>2</sub>Ti 和 Fe<sub>2</sub>Ti)在焊接区析出,并且数量不断增加,导致接头机械性能降低。不同温度热处理后的焊缝显微组织如图 5<sup>[62]</sup>所示,200 $^{\circ}$ C 热处

理后的晶粒更细。

Ng 等<sup>[63]</sup>采用光纤激光焊接了 NiTi 合金与 316L 不锈钢。加入 Ta 中间层后发现中间层厚度对接头的化学成分、显微组织和力学性能有显著影响。随着 Ta 含量的增加,脆性金属间化合物(TiFe<sub>4</sub>、Cr<sub>2</sub>Ti、TiFe 等)的含量降低。未加入中间层的接头拉伸应力和应变分别为 134MPa 和 0.63%,添加厚度为 50 $\mu$ m 的 Ta 中间层后,接头拉伸应力和应变分别达到 251MPa 和 2.7%。Ta 中间层的厚度继续增加,则会产生过量的 TaCr<sub>2</sub> 和 Ni<sub>3</sub>Ta,导致接头力学性能下降,断裂区域位于焊缝和不锈钢的界面。

综上所述,在 NiTi 合金/不锈钢异种激光焊接中易产生 Fe-Ti 脆性金属间化合物。添加 Ni、Ta 等中间层可以有效抑制脆性金属间化合物的产生,适当厚度的中间层是影响接头力学性能的重要参数。将热输入更多地分配给不锈钢也可以减少金属间化合物的数量,从而提升接头的力学性能。除此之外,采用合理温度

的焊后退火处理是提高异种合金接头力学性能的有效方法。

### 异种材料激光焊接接头金属间化合物的数值模拟研究进展

材料计算模拟可以预测材料性能并对试验过程进行模拟,目前主要的计算方法有第一性原理、分子动力学、蒙特卡洛、有限元分析、相场法、几何拓扑模型等。在异种材料激光焊接中,利用材料计算模拟可以更高效地预测试验结果并优化试验方案。图 6 是不同材料计算模拟方法在改善焊接质量上对应的领域。

#### 1 激光焊接组织模拟计算

Li 等<sup>[64]</sup>采用第一性原理计算分析了金属间化合物的性能及其对钢/铝激光焊接的影响。使用 Materials Studio 8.0 计算了 Fe<sub>3</sub>Al、FeAl、Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>、FeAl<sub>2</sub>、FeAl<sub>3</sub> 和 Fe<sub>4</sub>Al<sub>13</sub> 等金属间化合物的平衡点阵常数、力学性能和电子结构。结果表明,计算得到的内模复合材料的弹性常数满足力学稳定性条件。分别对以上金属间化合物

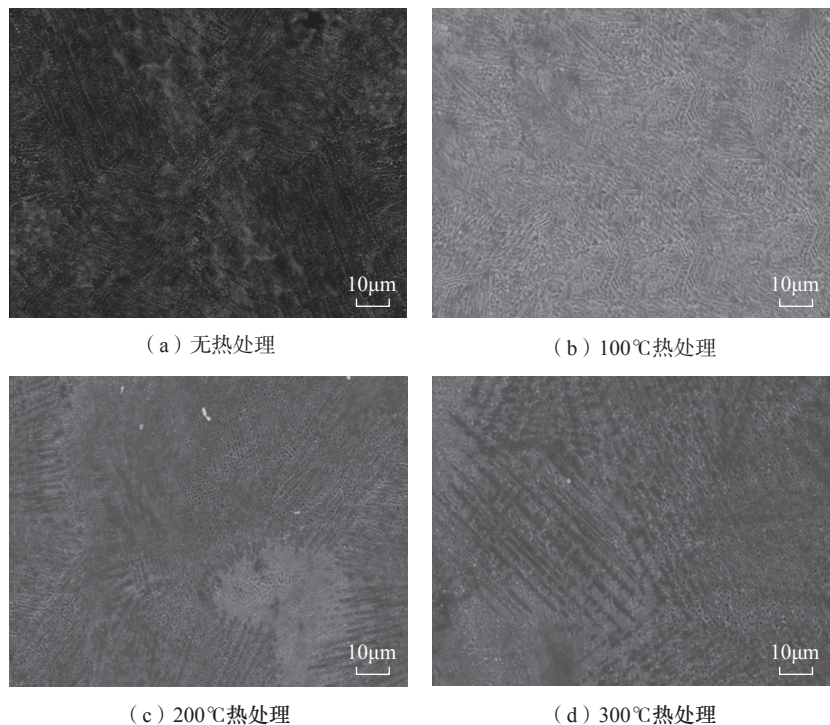


图 5 焊缝微观结构  
Fig.5 Weld microstructure

的弹塑性、总态密度、费米能级和电负性等进行了分析,并对 316L 不锈钢和 6061 铝合金进行了激光焊接试验验证,结果表明焊缝金属间化合物的性能与计算结果一致。

朱宗涛等<sup>[65]</sup>对 AZ31 镁合金和 6016 铝合金进行激光对接焊试验,由于接头中  $Mg_{17}Al_{12}$ 、 $Mg_2Al_3$  等金属间化合物的存在导致焊缝硬度变化大,并且接头在存在大量  $Mg_{17}Al_{12}$  的镁侧焊缝和熔合区断裂。郑博等<sup>[66]</sup>采用第一性原理赝势平面波法计算了  $Mg_{17}Al_{12}$  和  $Mg_{23}Al_{30}$  相的形成热、结合能和电子结构等数据。计算结果表明,相比于  $Mg_{17}Al_{12}$  相,  $Mg_{23}Al_{30}$  相具有更高的结合能和形成热,所以具有更强的稳定性和合金化能力。通过电子结构计算,发现  $Mg_{23}Al_{30}$  键合作用较强,结构更稳定。弹性常数计算结果表明,  $Mg_{17}Al_{12}$  为脆性相,  $Mg_{23}Al_{30}$  为塑性相。通过热力学性质计算,发现温度大于室温时,  $Mg_{23}Al_{30}$  的 Gibbs 自由能最小,热结构相对稳定。经验公式预测法结果表明,  $Mg_{23}Al_{30}$ 、 $Mg_{17}Al_{12}$  均为低熔点合金。Mg-Al 金属间化合物能带结构如图 7<sup>[66]</sup>所示,  $Mg_{17}Al_{12}$  具有更大的能量起伏,且  $Mg_{17}Al_{12}$  相邻轨道之间的重叠率小于  $Mg_{23}Al_{30}$ ,说明  $Mg_{23}Al_{30}$  具有更强的相成键性。

Miedema 模型<sup>[67]</sup>作为一种二元合金热力学的计算模型,是通过 3 个重要参数(原子尺寸、电子密度和电负性)和半经验公式来计算的。该模型可以很好地分析由于添加金属中间层而产生的增益效果。在焊接过程中,可以计算所有可能生成的化合物的生成焓<sup>[68]</sup>与系统的形成焓并进行对比<sup>[69]</sup>。檀财旺等<sup>[70]</sup>采用 Miedema 模型和 Toop 三元热力学模型相结合的方式,探究了 Al 中间层在镁/钛激光熔钎焊界面的扩散行为。结果表明, Al 元素的加入降低了界面自由能,促进了界面反应。此外,还发现 Al 元素的扩散方式为上

坡扩散,且有向 Ti 一侧扩散的趋势,在反应过程中 Ti 有降低 Al 化学势的趋势。

## 2 激光焊接熔池模拟计算

采用流体流动模型可以模拟金属激光冲击焊接(Laser impact welding, LIW)过程中的微观组织,以研究焊接成形过程中的瞬态现象。这种瞬态现象包括剪切应力、塑性应变、热响应和材料喷射的演变。在 Sunny 等<sup>[71]</sup>的研究中,首次用动态动力学蒙特卡罗方法模拟了激光粉末层熔合增材制造(Additive manufacturing, AM),预测了 1100 铝和 304 不锈钢的非均匀组织。这些微结构的性能参数被嵌入到 LIW 欧拉有限元模拟中,预测由变化的屈服面、堆垛层错能和晶界滑动效应引起

的晶粒伸长。预测的微观结构变形模式的趋势与文献试验研究结果高度一致。与现有的均质模型相比,具有不均匀 AM 微结构的新模型提高了塑性应变率,在更高的喷射温度下增加了材料的喷射。该模型可用于研究晶粒形貌(以及多晶金属织构)与冲击焊缝界面处发生的瞬态现象之间的相关性。

潘井春<sup>[72]</sup>利用精度较高的层流两相水平集方法,建立了钢/铝异种金属搭接焊二维瞬态三相耦合的几何模型,采用连续函数的判别方法处理了 Fe-Al 混合区的热力学参数,分析了混合区中熔池驱动力、反冲压力、表面张力及 Marangoni 对流等对熔池流体流动的影响和能量传递过程,探讨了激光熔焊模式对 Fe-Al 化

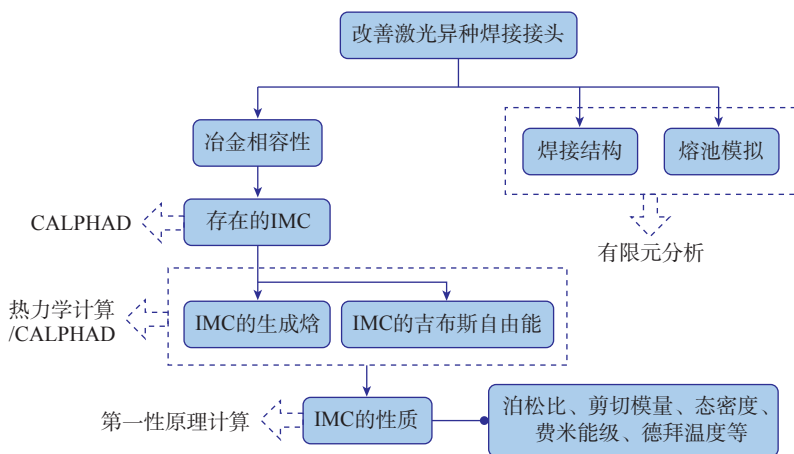


图 6 材料计算模拟在改善焊接质量上的应用

Fig.6 Application of material calculation and simulation in improving welding quality

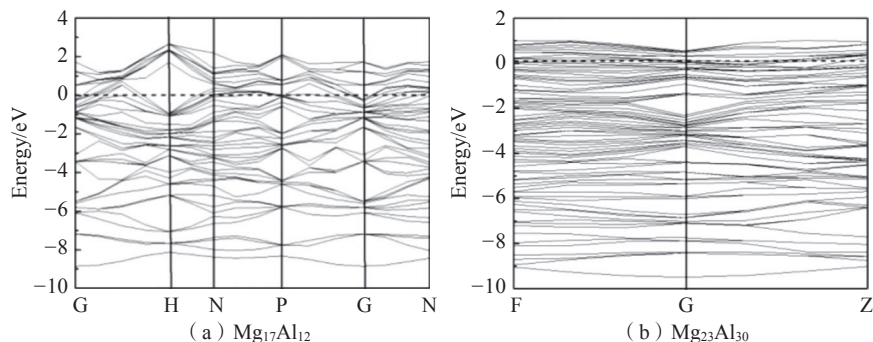


图 7 Mg-Al 金属间化合物的能带结构

Fig.7 Band structure of Mg-Al intermetallic compound

合物的分布规律,分析了添加 Ti 粉前后的熔池变化。

贾强等<sup>[73]</sup>采用光纤激光焊接高强钢 DP980,对温度场分布进行了有限元模拟计算,并对比了熔池截面的温度场分布与试验接头截面微观组织形貌(图 8<sup>[73]</sup>),模拟结果与试验焊缝形貌相吻合。图 9 为模拟的各个区域的热循环曲线,结果表明,激光焊接具有加热速度快、冷却迅速的特点,焊缝中心热循环温度最高可达 3204 °C。

### 结论

激光焊接具有节能、高效、绿色、精度高等优点,因此得到了广泛的应用。随着焊接设备和焊接工艺的进步和发展,异种金属激光焊接从焊接方法和工艺改进转向更深入的性能优化研究和界面调控机理分析。由于通过试验手段很难原位观测焊缝金属间化合物,需要通过多种模拟手段对其进行分析。

(1)随着母材对激光束能量的吸收,温度的改变使元素在熔池中发生不同的反应。被焊母材的物理和

化学性质差异是产生脆性金属间化合物的重要原因。试验研究证明,加入中间层有效阻碍了界面母材元素的交换,优化激光参数或采用激光偏置可以减少易产生金属间化合物的元素进入熔池反应,从而减少金属间化合物产生,减少连续金属间化合物层的形成,实现性能的优化。焊后热处理可以有效控制因冷却析出的金属间化合物并提高异种合金激光焊接接头的力学性能。

(2)运用计算材料学,可以实现试验模拟和结果预测。通过计算焊接接头中金属间化合物的平衡点阵常数、力学性能和电子结构等参数可以判断化合物的化学稳定性,模拟材料剪切应力、塑性应变等性能,从而预测 IMC 的各项性能。随着研究的逐步深入,计算材料学的数据库日益扩大,将能够更准确、更高效地指导和优化研究过程。

(3)添加中间层可以有效缓解金属间化合物对接头性能的不利作用,但目前中间层的选取缺少通用的理论支撑,控制热输入法也需要更多的实践探索。基于计算材料学的仿

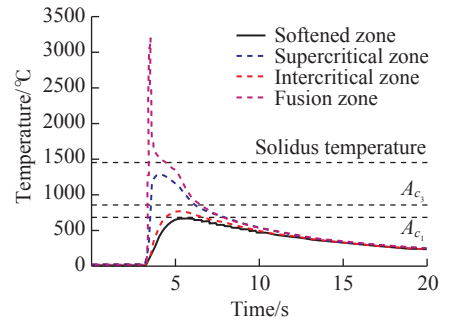


图 9 有限元模拟热循环曲线  
Fig.9 Finite element simulation of thermal cycle curve

真模拟,实现激光热源工艺-熔池(有限元分析)-中间层选择-界面组织(第一性原理和热力学分析)-力学性能(分子动力学分析)的多模拟手段耦合,对改善焊缝性能,拓宽异种金属激光焊接的实际工程应用具有重要的价值。

### 参考文献

[1] 赵燕春,张培磊,顾俊杰. 双束激光焊接的研究现状[J]. 材料导报, 2018, 32(S1): 345-349.  
ZHAO Yanchun, ZHANG Peilei, GU Junjie. Research status on dual-beam laser welding[J]. Materials Report, 2018, 32(S1): 345-349.

[2] DEVIREDDY K, CHEEPUM M, DEVURIV. A review of research progress on dissimilar laser weld-brazing of automotive applications[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 330: 012073.

[3] 韩冰. 铝锂合金 T 型接头双侧激光焊接组织特征及裂纹控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.  
HAN Bing. Microstructure characteristics of double-sided laser beam welded aluminium lithium alloys T-joints and its crack control[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.

[4] 孙轲,孙盛芝,邱建荣. 超短脉冲激光焊接非金属材料研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(11): 290-299.  
SUN Ke, SUN Shengzhi, QIU Jianrong. Research progress on ultrashort pulsed laser welding of non-metallic materials[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(11): 290-299.

[5] 曹璠,刘淑梅,陈凯,等. 异种金属激光焊接的研究进展[J]. 热加工工艺, 2016, 45(17): 9-12.

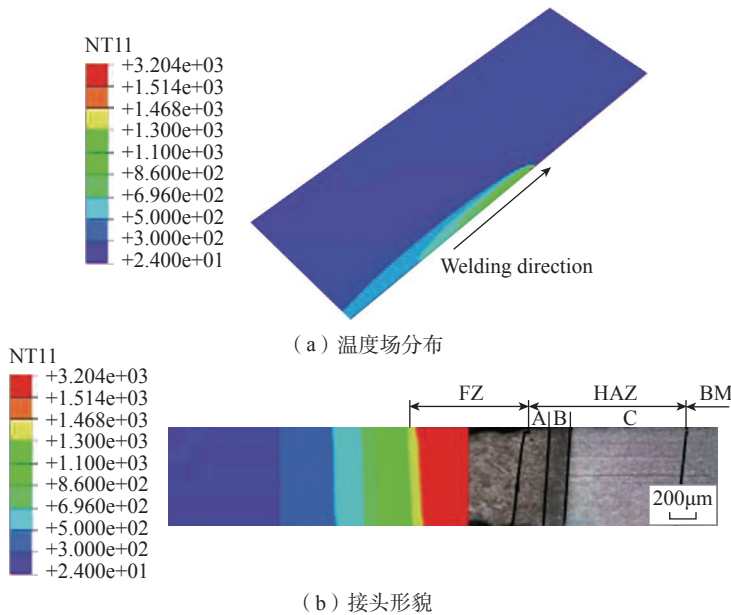


图 8 焊接温度场分布及接头形貌  
Fig.8 Welding temperature field distribution and joint morphology

- CAO Fan, LIU Shumei, CHEN Kai, et al. Research progress in laser welding of dissimilar metal[J]. Hot Working Technology, 2016, 45(17): 9–12.
- [6] 于启湛, 史春元. 金属间化合物的焊接 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- YU Qizhan, SHI Chunyuan. Welding of intermetallic compounds[M]. Beijing: China Machine Press, 2016.
- [7] 章桥新. 论金属间化合物的脆性及其克服途径 [J]. 稀有金属材料与工程, 1990, 20(6): 27–31.
- ZHANG Qiaoxin. On the brittleness of intermetallic compounds and ways to overcome it[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 1990, 20(6): 27–31.
- [8] 王玉航, 汪进凯, 傅泽航, 等.  $\gamma$ -TiAl 金属间化合物 4 种剪切变形方式的第一性原理计算 [J]. 上海金属, 2018, 40(3): 6–10.
- WANG Yuhang, WANG Jinkai, FU Zehang, et al. First-principles calculation of four shear deformations in  $\gamma$ -TiAl intermetallic compound[J]. Shanghai Metals, 2018, 40(3): 6–10.
- [9] 黄广棋, 张桂凯, 罗朝以, 等. Fe-Al 金属间化合物氢脆效应研究现状 [J]. 材料导报, 2018, 32(11): 1878–1883.
- HUANG Guangqi, ZHANG Guikai, LUO Zhaoyi, et al. A review on hydrogen embrittlement of Fe-Al intermetallics[J]. Materials Reports, 2018, 32(11): 1878–1883.
- [10] 石铭霄, 陈书锦, 胡庆贤, 等. 钢/铝焊接接头金属间化合物生长机制及调控研究现状 [J]. 电焊机, 2017, 47(5): 12–15.
- SHI Mingxiao, CHEN Shujin, HU Qingxian, et al. Research status on growth mechanism and regulation of intermetallic compound of welded joint of steel/niobium[J]. Electric Welding Machine, 2017, 47(5): 12–15.
- [11] FANG Y J, JIANG X S, MO D F, et al. A review on dissimilar metals' welding methods and mechanisms with interlayer[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 102(9–12): 2845–2863.
- [12] YANG J L, XUE S B, WU Y Y, et al. Wetting behaviour of Zn-Al filler metal on a stainless steel sub-strate[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2018, 23(1): 1–6.
- [13] SONG T F, JIANG X S, SHAO Z Y, et al. Microstructure and mechanical properties of vacuum diffusion bonded joints between Ti-6Al-4V titanium alloy and AISI316L stainless steel using Cu/Nb multi-interlayer[J]. Vacuum, 2017, 145: 68–76.
- [14] ZHANG Y F, HUANG J H, CHENG Z, et al. Study on MIG-TIG double-sided arc welding-brazing of aluminum and stainless steel[J]. Materials Letters, 2016, 172: 146–148.
- [15] BAGHJARI S H, GHAINI F M, SHAHVERDI H R, et al. Laser welding of niobium to 410 steel with a nickel interlayer produced by electro spark deposition[J]. Materials & Design, 2016, 107: 108–116.
- [16] HOFMEISTER W, GRIFFITH M. Solidification in direct metal deposition by LENS processing[J]. The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society, 2001, 53(9): 30–34.
- [17] ÜSTÜNDAĞ Ö, BAKIR N, GUMENYUK A, et al. Influence of oscillating magnetic field on the key-hole stability in deep penetration laser beam welding[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 135: 106715.
- [18] CASALINO G, MORTELLO M. A FEM model to study the fiber laser welding of Ti6Al4V thin sheets[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 86(5–8): 1339–1346.
- [19] QUAZI M M, ISHAK M, FAZAL M A, et al. Current research and development status of dissimilar materials laser welding of titanium and its alloys[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 126: 106090.
- [20] 张亚亮, 刘佳, 石岩, 等. 激光-电弧复合焊不同引导方式对其焊接成形质量的影响研究 [J]. 应用激光, 2017, 37(2): 229–233.
- ZHANG Yaliang, LIU Jia, SHI Yan, et al. Study on the influence of different laser-MIG arc hybrid welding methods on the welding quality of aluminum alloy[J]. Applied Laser, 2017, 37(2): 229–233.
- [21] BAO L L, WANG Y, HAN T. Study on microstructure-toughness relationship in heat affected zone of EQ70 steel by laser-arc hybrid welding[J]. Materials Characterization, 2021, 171: 110788.
- [22] 孙建华. 钢/铝异种金属激光-电弧复合焊接数值模拟及实验研究 [D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2020.
- SUN Jianhua. Numerical simulation and experimental study on laser-arc hybrid welding of steel/aluminum dissimilar metals[D]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning, 2020.
- [23] 杨川. 超声辅助铝合金激光-MIG 复合焊接方法研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
- YANG Chuan. Research on ultrasound-assisted laser-metal inert gas hybrid welding of aluminum alloy[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [24] 林学春, 赵伟芳, 侯玮, 等. 一种结合激光和搅拌摩擦焊的复合焊接方法: CN103008896A[P], 2013–04–03.
- LIN Xuechun, ZHAO Weifang, HOU Wei, et al. Hybrid welding method combining laser and friction stirwelding: CN103008896A[P], 2013–04–03.
- [25] 董永刚, 熊照伟, 王钰博, 等. 一种基于激光加热搅拌摩擦焊的车轮踏面修复装置: CN110355461B[P]. 2020–10–02.
- DONG Yonggang, XIONG Zhaowei, WANG Yubo, et al. A wheel tread repair device based on laser heating friction stir welding: CN110355461B[P]. 2020–10–02.
- [26] 刘晓寒, 倪家强, 刘艳梅. TA15 钛合金薄板激光-TIG 复合焊接接头疲劳性能研究 [J]. 热加工工艺, 2019, 48(3): 15–18, 23.
- LIU Xiaohan, NI Jiaqiang, LIU Yanmei. Study on fatigue property of laser-TIG hybrid welded joint of TA15 alloy thin plate[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(3): 15–18, 23.
- [27] 王晓虹. 钢/铝异种金属激光焊接接头界面特性的研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- WANG Xiaohong. Research on the interface characteristics of steel/Al dissimilar metal laser welding joint[D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [28] 张文超. 铝钢异种金属的光纤激光焊接行为研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
- ZHANG Wenchao. Research on fiber laser welding behavior of dissimilar metals of Al and steel[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014.
- [29] MOHAMMADPOUR M, YAZDIAN N, YANG G, et al. Effect of dual laser beam on dissimilar welding-brazing of aluminum to galvanized steel[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 98: 214–228.
- [30] FILLIARD G, EL MANSORI M, TIRADO L, et al. Industrial fluxless laser weld-brazing process of steel to aluminium at high brazing speed[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017, 25: 104–115.
- [31] CHEN S H, ZHANG M X, HUANG J H, et al. Microstructures and mechanical property of laser butt welding of titanium alloy to stainless steel[J]. Materials & Design, 2014, 53: 504–511.
- [32] NING J, ZHANG L J, JIANG G C,

et al. Narrow gap multipass laser butt welding of explosion welded CP-Ti/Q235B bimetallic sheet by using a copper interlayer[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 701: 587-602.

[33] CHEREPANOV A N, MALI V I, MALIUTINA I N, et al. Laser welding of stainless steel to titanium using explosively welded composite inserts[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 90(9-12): 3037-3043.

[34] GAO M, MEI S W, WANG Z M, et al. Characterisation of laser welded dissimilar Ti/steel joint using Mg interlayer[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2012, 17(4): 269-276.

[35] CHEN H C, BI G J, LEE B Y, et al. Laser welding of CP Ti to stainless steel with different temporal pulse shapes[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 231: 58-65.

[36] SATOH G, YAO Y L, QIU C. Strength and microstructure of laser fusion-welded Ti-SS dissimilar material pair[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 66(1-4): 469-479.

[37] ZHANG Y, SUN D Q, GU X Y, et al. Nd: YAG pulsed laser welding of dissimilar metals of titanium alloy to stainless steel[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94(1-4): 1073-1085.

[38] TOMASHCHUK I, GREVEY D, SALLAMAND P. Dissimilar laser welding of AISI 316L stainless steel to Ti6-Al4-6V alloy via pure vanadium interlayer[J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 622: 37-45.

[39] CHEREPANOV A N, ORISHICH A M, PUGACHEVA N B, et al. Investigation of the structure and properties of titanium-stainless steel permanent joints obtained by laser welding with the use of intermediate inserts and nanopowders[J]. Thermophysics and Aeromechanics, 2015, 22(2): 135-142.

[40] GAO M, CHEN C, WANG L, et al. Laser-arc hybrid welding of dissimilar titanium alloy and stainless steel using copper wire[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2015, 46(5): 2007-2020.

[41] ZHANG Y, SUN D Q, GU X Y, et al. Nd: YAG pulsed laser welding of TC4 Ti alloy to 301L stainless steel using Ta/V/Fe composite interlayer[J]. Materials Letters, 2018, 212: 54-57.

[42] ZHANG Y, SUN D Q, GU X Y, et al. Nd/YAG pulsed laser welding of TC4 Ti

alloy to 301L stainless steel via pure copper interlayer[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 90: 953-961.

[43] QUAZI M M, ISHAK M, FAZAL M A, et al. Current research and development status of dissimilar materials laser welding of titanium and its alloys[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 126: 106090.

[44] GAO X L, LIU J, ZHANG L J. Dissimilar metal welding of Ti6Al4V and Inconel 718 through pulsed laser welding-induced eutectic reaction technology[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 96(1-4): 1061-1071.

[45] 吕攀. 不同中间层对钛-钢激光焊接焊缝组织与性能的影响 [D]. 南京: 南京理工大学, 2017.

LÜ Pan. Microstructures and mechanical properties of laser welded titanium-steel joints with different interlayers[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017.

[46] 杨胜, 李军兆, 刘一搏, 等. 钛/钢异种金属激光焊接接头微观组织及数值模拟研究 [J]. 电焊机, 2020, 50(8): 101-105, 141.

YANG Sheng, LI Junzhao, LIU Yibo, et al. Research on microstructure and numerical simulation of laser welding joint of Ti/steel dissimilar metals[J]. Electric Welding Machine, 2020, 50(8): 101-105, 141.

[47] ZHANG Y, SUN D Q, GU X Y, et al. A hybrid joint based on two kinds of bonding mechanisms for titanium alloy and stainless steel by pulsed laser welding[J]. Materials Letters, 2016, 185: 152-155.

[48] ZHANG Y, SUN D Q, GU X Y, et al. Nd: YAG pulsed laser welding of dissimilar metals of titanium alloy to stainless steel[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94(1-4): 1073-1085.

[49] 李雷, 于治水, 张培磊. 镁铝异种材料激光焊接的研究现状及发展 [J]. 热加工工艺, 2017, 46(17): 19-24.

LI Lei, YU Zhishui, ZHANG Peilei. Research status and development of laser welding of magnesium and aluminum dissimilar materials[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(17): 19-24.

[50] 单际国, 雷祥, 谭稳达, 等. AZ<sub>31</sub>B 变形镁合金 CO<sub>2</sub> 激光焊接模式及焊缝成形特点 [J]. 焊接学报, 2008, 29(4): 9-12, 113.

SHAN Jiguo, LEI Xiang, TAN Wenda, et al. Welding modes and weld formation characteristics of CO<sub>2</sub> laser welding of wrought magnesium alloy AZ<sub>31</sub>B[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(4): 9-12, 113.

[51] 刘正, 张奎, 曾小勤. 镁基轻质合金理论基础及其应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.

LIU Zheng, ZHANG Kui, ZENG Xiaoqin. Theoretical basis and application of Mg-based light alloys[M]. Beijing: China Machine Press, 2006.

[52] 田伟. Mg/Al 异种金属激光焊接试验研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2013.

TIAN Wei. Experimental study on the laser welding of magnesium and aluminum dissimilar metal[D]. Changsha: Hunan University, 2013.

[53] 田伟, 周恺武, 乔小杰, 等. 镁/铝异种金属激光焊气孔形成原因研究 [J]. 激光技术, 2013, 37(6): 825-828.

TIAN Wei, ZHOU Dianwu, QIAO Xiaojie, et al. Study on the reason of porosity formation in laser welding of magnesium and aluminum dissimilar metal[J]. Laser Technology, 2013, 37(6): 825-828.

[54] 虞钢, 赵树森, 张永杰, 等. 异种金属激光焊接关键问题研究 [J]. 中国激光, 2009, 36(2): 261-268.

YU Gang, ZHAO Shusen, ZHANG Yongjie, et al. Research on key issues of laser welding of dissimilar metal[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(2): 261-268.

[55] 李亚江, 王娟, 刘强. 有色金属焊接及应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.

LI Yajiang, WANG Juan, LIU Qiang. Non-ferrous metal welding and application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.

[56] 苑世剑. 轻量化成形技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.

YUAN Shijian. Lightweight forming technology[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2010.

[57] 麻丁龙, 牛锐锋, 赵宏刚, 等. Zn 中间层对镁/铝异种金属激光焊接的影响 [J]. 激光技术, 2017, 41(6): 858-861.

MA Dinglong, NIU Ruifeng, ZHAO Honggang, et al. Effect of Zn interlayer on laser welding of Mg/Al dissimilar metal[J]. Laser Technology, 2017, 41(6): 858-861.

[58] 戴军, 杨莉, 张尧成, 等. AZ31 镁合金和铝基复合材料的脉冲激光焊接 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(5): 267-272.

DAI Jun, YANG Li, ZHANG Yaocheng, et al. Pulsed laser welding of AZ31 magnesium alloy and aluminum matrix composites[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(5): 267-272.

[59] QUINTINO L, MIRANDA R M. Welding shape memory alloys with NdYAG lasers[J]. Soldagem & Inspeção, 2012, 17(3):

210–217.

[60] POUQUET J, MIRANDA R M, QUINTINO L, et al. Dissimilar laser welding of NiTi to stainless steel[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 61: 205–212.

[61] SHAMSOLHODAEI A, OLIVEIRA J P, SCHELL N, et al. Controlling intermetallic compounds formation during laser welding of NiTi to 316L stainless steel[J]. *Intermetallics*, 2020, 116: 106656.

[62] ASADI S, SAEID T, VALANEZHAD A, et al. The effect of annealing temperature on microstructure and mechanical properties of dissimilar laser welded superelastic NiTi to austenitic stainless steels orthodontic archwires[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2020, 109: 103818.

[63] NG C H, MOK E S H, MAN H C. Effect of Ta interlayer on laser welding of NiTi to AISI 316L stainless steel[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 226: 69–77.

[64] LI Y L, LIU Y R, YANG J. First principle calculations and mechanical properties of the intermetallic compounds in a laser welded steel/aluminum joint[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 122: 105875.

[65] 朱宗涛, 薛珺予, 陈辉. 6061-T6/AZ<sub>31</sub>B 异种金属激光焊接接头组织及性能[J]. *稀有金属材料与工程*, 2017, 46(7):

1977–1982.

ZHU Zongtao, XUE Junyu, CHEN Hui. Microstructures and properties of 6061-T6/AZ<sub>31</sub>B butt joints by laser welding[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2017, 46(7): 1977–1982.

[66] 郑博, 赵丽, 董仕节, 等. 镁铝合金间化合物的第一性原理研究[J]. *材料导报*, 2019, 33(14): 2426–2430.

ZHENG Bo, ZHAO Li, DONG Shijie, et al. First principles study on Mg–Al intermetallic compounds[J]. *Materials Reports*, 2019, 33(14): 2426–2430.

[67] ZHANG R F, LIU B X. Proposed model for calculating the standard formation enthalpy of binary transition-metal systems[J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 81(7): 1219–1221.

[68] MIEDEMA A R, DE CHATEL P F. A semiempirical approach to the heat of formation problem[J]. *Theory of Alloy Phase Formation*, 1979: 344–389.

[69] SHAH L H, GERLICH A, ZHOU Y. Design guideline for intermetallic compound mitigation in Al-Mg dissimilar welding through addition of interlayer[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 94(5–8): 2667–2678.

[70] 檀财旺, 黄煜华, 陈波, 等. 镁/钛激光熔钎焊界面微观结构与元素热力学行

为分析[J]. *中国激光*, 2016, 43(3): 93–101.

TAN Caiwang, HUANG Yuhua, CHEN Bo, et al. Microstructure and thermodynamic behavior of laser welded– brazed Mg/Ti dissimilar joint[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(3): 93–101.

[71] SUNNY S, GLEASON G, MATHEWS R, et al. Simulation of laser impact welding for dissimilar additively manufactured foils considering influence of inhomogeneous microstructure[J]. *Materials & Design*, 2021, 198: 109372.

[72] 潘井春. 钢/铝异种金属激光深熔焊过程中熔池行为及机理研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.

PAN Jingchun. Study on the behavior and mechanism of the molten pool in laser deep fusion welding of steel/aluminum dissimilar metals[D]. Changsha: Hunan University, 2018.

[73] 贾强, 郭伟, 彭鹏, 等. DP980 激光焊接温度场模拟及力学性能[J]. *稀有金属材料与工程*, 2017, 46(7): 1905–1911.

JIA Qiang, GUO Wei, PENG Peng, et al. Temperature field simulation and mechanical properties of laser welded DP980 steel joints[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2017, 46(7): 1905–1911.

通讯作者: 李红, 副教授, 博士, 研究方向为轻合金精密连接技术、异种材料连接技术、高品质连接材料。

## Research Progress on Formation and Control of Intermetallic Compounds in Laser Welding of Dissimilar Materials

LI Zhuoxin<sup>1</sup>, ZHANG Dongni<sup>1</sup>, YAN Qizhu<sup>1</sup>, ZHANG Yu<sup>1</sup>, HAN Yi<sup>1</sup>, Erika Hodúlová<sup>2</sup>, WEI Wei<sup>3</sup>, LI Hong<sup>1</sup>

(1. Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Slovak University of Technology, Trnava 91724, Slovak;

3. Yantai Production Base, Tianjin AMTec Co., Ltd., Yantai 264006, China)

**[ABSTRACT]** The research status of formation mechanism and control measures of intermetallic compounds in laser welding joints of Al/steel, Ti/steel, Mg/Al and NiTi SMA/SS are reviewed. The effects of different base metal compositions and different welding processes on intermetallic compounds in welded joints are compared and analyzed. Effective control of intermetallic compounds can be achieved by adding intermediate fillers, controlling heat input, and adopting hybrid welding processes, thereby optimizing welded joint structure and improving mechanical properties. The research progress of material computing in simulating and predicting the structure and performance of intermetallic compounds in laser welding joints of dissimilar metals is also reviewed.

**Keywords:** Dissimilar metals; Laser welding; Intermetallic compound (IMC); Computational simulation; Microstructure and properties

(责编 雷松)