

铝/钢异种金属激光填丝熔-钎焊连接工艺研究

张冬云 高双欣 高海芸 赵建哲

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

摘要 采用板条 CO₂ 激光器对铝-钢异种金属搭接接头进行激光填丝焊接试验研究。分析了不同热输入量对焊缝成形质量的影响以及不同热输入量对焊缝显微组织、焊缝物相及力学性能的影响。实验结果表明,与低能量密度参数下的焊接接头相比高能量密度参数下的焊缝内部组织将不再均匀,而是出现了条状或块状金属间化合物 FeAl,铝-铁界面产生的金属间化合物厚度增加,钢板熔化区主要物相也由低能量密度时的 FeAl 和 Al 与 α -Fe 形成的固溶体转变为 Fe₃Al 和 Al 与 α -Fe 形成的固溶体,从而降低了焊缝的力学性能。拉剪结果显示,高能量密度焊接参数下的焊缝抗拉(剪)强度仅为低能量密度下的 72.9%。

关键词 激光技术;激光填丝焊接;搭接焊;金属间化合物

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.061403

Wire Feeding Laser Brazing and Fusion for Al-Fe Dissimilar Metal

Zhang Dongyun Gao Shuangxin Gao Haiyun Zhao Jianzhe

(College of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract Dissimilar metal joining of steel/aluminum alloy by slab CO₂ laser beam welding with filling wire is investigated and the influence of different heat input on the weld formation quality is introduced. The influence of different heat input on microstructure, phase and mechanical properties of joints are analyzed. The experimental results show that microstructure in the joints with higher heat input parameters compared with lower heat input parameters is no longer homogenous, Fe-Al intermetallic phase with the shape of strip and lump can be found in the joints, the thickness of the intermetallics layer increases in the interface of aluminum/steel joints, and the main phase in the melts of joints transforms from FeAl and solid solution of Al in α -Fe to Fe₃Al and solid solution of Al in α -Fe. Mechanical properties deteriorate with the increase of the intermetallics layer. Tensile test shows that tensile (or shear) strength with high heat input parameters is 72.9% of that with low heat input parameters.

Key words laser technique; laser welding with filler wire; lap welding; intermetallics

OCIS codes 140.3300; 140.3390; 160.3900

1 引言

为了响应世界范围内节能减排的呼声,轻质铝合金在汽车车身上得到了越来越多的应用,出于对车身结构等安全因素考虑车身框架仍需采用高强钢类材料,因此钢-铝异种金属的连接成为必要。钢与铝合金的热、物理、化学特性相差很多,它们之间直接熔焊连接难度很大。因为熔融状态下 Fe 与 Al 原子之间是无限互溶的,室温时 Fe 在 Al 中的溶解度几乎变为零,此时 Fe 便会与 Al 原子形成脆硬的金属间化合物,降低焊接接头性能^[1~5]。目前,现有的焊接工艺如摩擦焊、扩散焊、爆炸焊、电弧熔-钎焊及电子束熔-钎焊在施焊条件或焊缝质量上存在各种缺陷,为此国内外的许多研究机构相继开展了钢与铝合金激光焊接的研究。G. Sierra 等采用 Nd:YAG 激光器、4047(Al-12Si)焊丝连接 6016T4 铝合金(1.2 mm)和 DC04 钢(1.0 mm),在焊接接头中形成的 Fe-Al-Si 金属间化合物层厚度小于 2 μ m,接头的机械强度达到了 190 N/mm^[6]。Martinieu 等^[7]采用 Nd:YAG 激光器、锌基焊丝连接 6061-T4 铝合金与 GXES 钢板,焊接接头断裂强度达到

收稿日期: 2011-01-11; 收到修改稿日期: 2011-02-21; 网络出版日期: 2011-05-01

作者简介: 张冬云(1969—),女,副研究员,主要从事快速成型和激光焊接技术等方面的研究。

E-mail: zhangdy@bjut.edu.cn

200 N/mm 以上。H. Laukant 等^[8]受激光钎焊原理启发,采用激光填丝焊实现了铝合金与镀锌钢板的连接,焊接过程不需要添加任何钎剂,通过调整焊接参数,金属间化合物厚度可以小于 $5\ \mu\text{m}$ 。

由于材料性能差异对焊接接头微观组织与宏观性能影响等原因,钢与铝的焊接具有一定难度^[9,10],国内在铝/钢异种金属激光连接方面的研究尚属起步。本文针对汽车车身使用的 6061 铝合金和 DC06 钢的焊接过程为主要研究对象,进行铝/钢异种金属之间搭接接头的激光连接研究。通过调节板条 CO_2 激光焊接时的热输入量,控制连接区微小熔化区的尺寸、控制液态金属在钢板上的润湿铺展状况、控制界面区金属间化合物的层厚以及焊接接头质量,从而改善焊接接头的力学性能。并对焊缝界面处和内部组织及物相做了分析,最后测试了力学性能。

2 实验材料、设备及方法

使用的材料为 DC06 钢板(厚度 1.0 mm)、6061-T6 铝合金板(厚度 2.0 mm)、AlSi5(ER4043)焊丝。其中 6061-T6 铝合金薄板的状态为固溶强化和人工时效处理;组织为 $\alpha(\text{Al})$ 和细小颗粒状强化相 Mg_2Si 。DC06 低碳钢板的室温组织为铁素体。材料及焊丝的化学成分(质量分数,%)分别见表 1、表 2。

表 1 镀锌钢板的化学成分

Table 1 Chemical composition of galvanized steel sheet

Composition	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Fe
DC06	≤ 0.02	—	≤ 0.25	≤ 0.02	≤ 0.02	—	—	—	remain

表 2 6061 铝合金(T6)及 AlSi5 焊丝的化学成分

Table 2 Chemical composition of 6061(T6) and the welding wire AlSi5

Composition	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
6061	0.65	0.39	0.22	0.11	0.96	0.17	0.1	0.08	remain
AlSi5	4.5~6.0	0.8	0.3	0.05	0.05	—	0.1	0.2	remain

实验设备为德国 Rofin-Sinar 公司的扩散板条 CO_2 激光器,最大输出功率为 3500 W,采用焦距 $f=300\ \text{mm}$ 的铜抛物镜聚焦,运动系统为 Arnold 公司的六轴联动加工机床。铝/钢异种金属激光填丝熔-钎焊连接过程如图 1 所示。实验采用钢板在下、铝板在上的搭接方法,焊接试验参数见表 3。

采用 OLYMPUS PMG3 光学显微镜、S4800 (HITACHI)冷场发射扫描电镜(SEM)对接头的微观组织进行分析,并对焊缝的局部区域进行能谱分析。采用 HXD-1000TM/LCD 数字式显微硬度计对焊接接头金相试样进行显微硬度测试。采用 810Material Test System 型电子万能试验机进行拉剪试验测试抗拉强度。

表 3 焊接参数

Table 3 Joining parameters

	Energy density / ($10^6\ \text{W}/\text{cm}^2$)	Welding speed / (m/min)	Wire feed rate / (cm/min)	Shielding gas (He) / (L/min)
Low welding power	1.57~2.46	1~5	4~9	25
High welding power	2.56~3.34	1~5	4~9	25

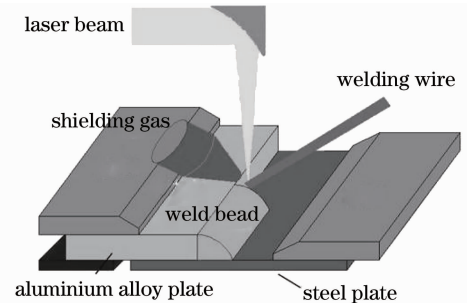


图 1 铝与钢的激光填丝焊接示意图

Fig. 1 Schematic description of experimental set-up used for laser welding

3 实验结果及分析

采用扩散板条 CO_2 激光器对铝/钢异种金属进行熔-钎焊连接过程中,在钢板与焊缝的界面处产生微小的熔化区,熔化区由金属间化合物区与 Fe-Al 相互扩散区组成,熔化区的存在比仅通过扩散机制连接的钎焊

接头的机械性能有很大提高。因此焊缝的界面可分为两个区:熔化区和钎接区,如图2所示。图中的焊缝有效宽度、钢板熔化宽度与深度是评价焊缝成形质量的标准,激光参数对其的影响将在下面进行讨论。

3.1 焊接参数对焊缝成形的影响

激光能量密度、焊接速度及送丝速度是填丝焊接过程中对焊接质量具有较大影响的参数。因为这些参数将影响到焊接区热输入量的大小,而热输入量将直接影响焊丝熔化情况、熔化焊丝在钢板上的润湿扩展情况、熔化区金属间化合物层厚以及Fe、Al等金属原子向对方的扩散情况,进而决定了焊缝成形质量以及机械性能。因而在铝/钢异种金属激光填丝熔-钎焊连接过程中,通过调整重要的激光焊接参数实施对焊接区热量的控制是非常重要的。

实验表明,其他参数一定、能量密度较低时焊丝熔化不充分,焊缝有效宽度较小;随着能量密度的增加,焊接区的热输入量大、温度高,熔化的焊丝可以在钢板上很好地润湿铺展,因此焊缝有效宽度较大,甚至大于2.7 mm;当能量密度过大时焊接区的熔宽、熔深也突然升高,金属间化合物的层厚增加,导致焊接接头脆化。

而焊缝有效宽度随着焊接速度增加而减小,当速度大于2 m/min时焊缝有效宽度减小的速度加快,这与热输入量对焊丝熔化状态的影响有关。热输入量小时,一方面焊丝不能充分熔化,焊接区温度低,这些都会影响液态金属在钢板上的铺展,从而影响了焊缝的有效宽度。焊接区的熔深和熔宽随焊接速度的增大而减小,当焊接速度等于1 m/min时,出现钢板被焊透的现象;当焊接速度等于4 m/min时,钢板表面几乎不发生熔化。焊接速度参数在2~3 m/min时,处于焊接区的钢板发生微熔,形成较薄的金属间化合物层,发生Al、Fe与原子向对方的扩散,焊缝正面成形较好,背面无焊透现象,图3是在焊接功率密度 $2.16 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 、焊接速度2 m/min、离焦量为+4时的焊缝成形。其中图3(a)为焊缝正面成形,图3(b)为背面成形,图3(c)为界面形貌。

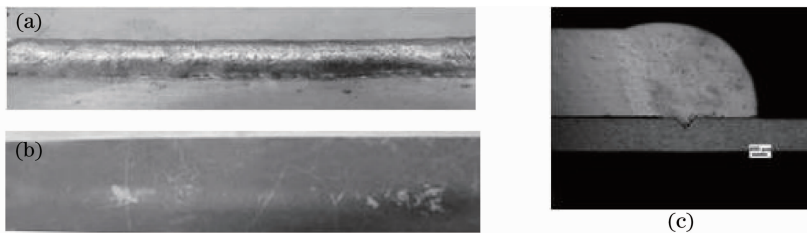


图3 适当焊接参数下的焊缝成形

Fig. 3 Weld bead appearance with appropriate parameters

送丝速度对激光能量分布起到一定的平衡作用,当其他参数不变而送丝速度较小时,激光束用于熔化试件上的能量将增加,钢板熔宽、熔深增加,表面出现纵向裂纹。而送丝速度过快时激光不能充分熔化,熔化区的熔宽、熔深较小或无熔化区,液态金属在钢板上不能进行较好的润湿铺展,发生有限的Al、Fe与原子向对方的扩散,接头成形质量不好,性能较差。

进一步的实验显示,铝/钢异种金属激光填丝熔-钎焊连接存在低能量密度区和高能量密度区两个成形较好的焊接参数区,分别为:低能量密度区域内能量密度 $2.16 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 、焊接速度2 m/min、送丝速度6 m/min;高能量密度区域内能量密度 $2.95 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 、焊接速度3 m/min、送丝速度9 m/min。

3.2 焊接接头显微组织

铝/钢异种金属激光填丝熔-钎焊连接熔化区界面处是化学成分急剧变化的区域,通过物质之间的相互作用形成了金属间化合物,产生了物质的定向扩散现象。界面的结合情况以及焊缝组织决定了焊接接头的性能。从实验结果看,热输入量的变化是影响焊缝成形及焊缝组织变化的主要原因。选取低能量密度区和高能量密度焊缝成形较好的两组参数的焊接接头进行分析。图4(a)和(b)分别为低能量密度和高能量密度

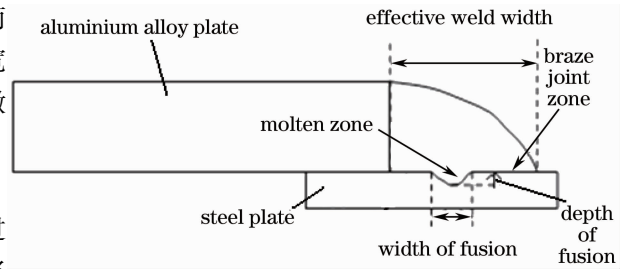


图2 铝/钢异种金属激光填丝熔-钎焊连接接头质量评价

Fig. 2 Quality evaluation parameters of laser joints of dissimilar metal

参数下焊缝的宏观形貌,(c)~(j)分别为低能量密度和高能量密度参数下熔化区[(c)、(d)]、钎接区[(e)、(f)]、焊缝上部[(g)、(h)]、铝母材熔合线附近[(i)、(j)]的微观形貌图。

图 4(c),(d)为钢板熔化区形貌。对比发现,在熔化区的界面上均产生了金属间化合物,厚度不同:低能量密度参数时平均厚度为 $4.3 \mu\text{m}$;高能量密度参数时平均厚度为 $9.04 \mu\text{m}$ 。从图 4(c)可以看出,由于热输入量小,钢板熔化区附近几乎无热影响区。而由图 4(d)可以看出,钢板熔化区附近的组织存在细化区,为相

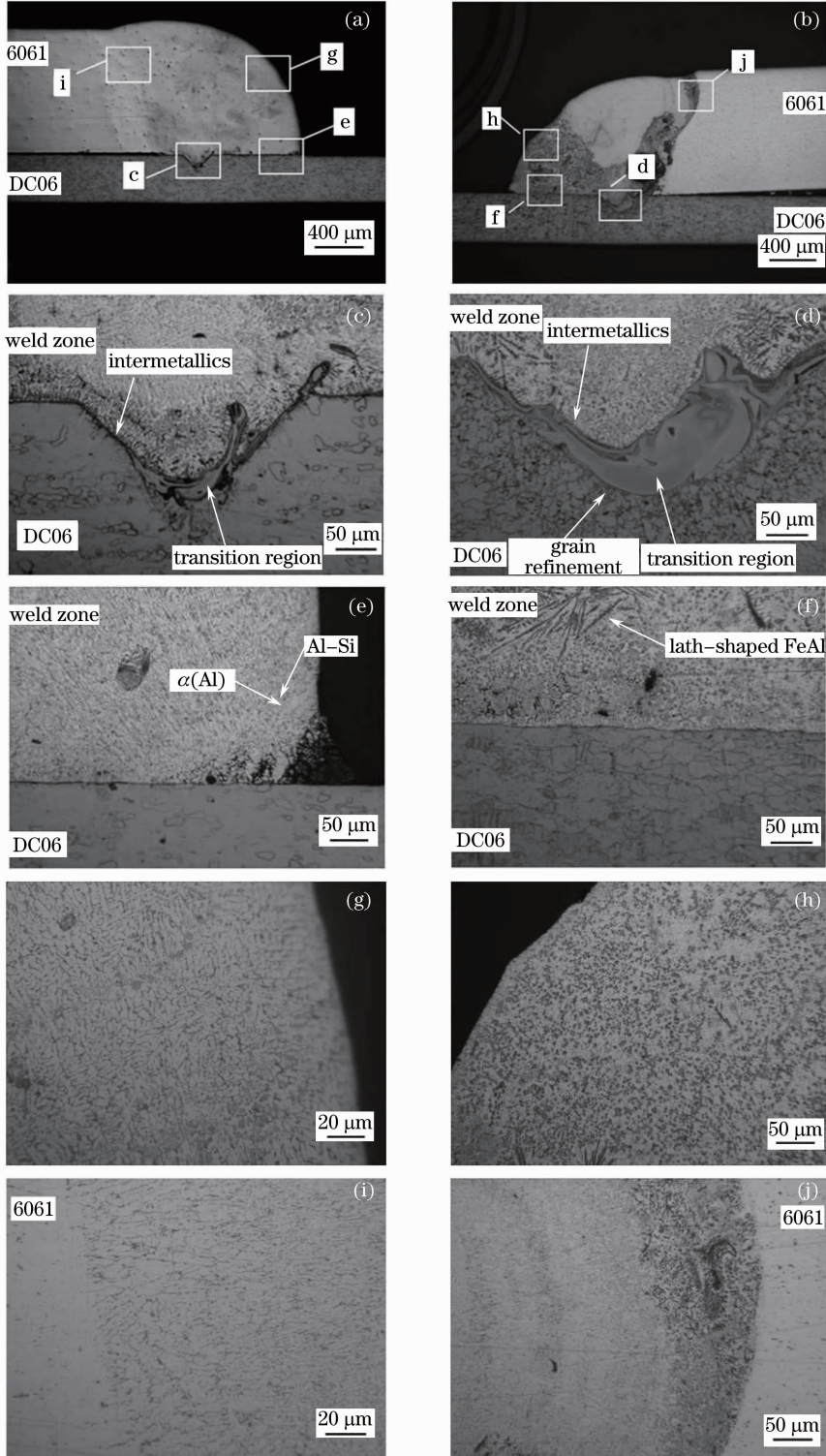


图 4 不同能量密度参数下焊缝各区的金相组织

Fig. 4 Microstructure in different zones of laser joints with different heat inputs

变重结晶区。该区的出现是由于高能量密度下,熔化区附近的热影响区温度范围较高,为 $AC_3 \sim TK_S$ (TK_S 为晶粒开始急剧粗化的温度)^[11],达到了钢的正火温度。此时该区域中的铁素体转化为奥氏体,由于激光焊接时冷却速度快,在高温下停留的时间很短,所以奥氏体晶粒还未长大,经空冷转化为均匀细小的铁素体。从宏观上看此处的晶粒比母材小得多,而且越靠近熔化区,晶粒细化越明显。显微硬度测试显示,该区的显微硬度值较母材高。此外,图 4(c)和(d)中熔化区正下方均出现了表面光滑的过渡区。经能谱仪(EDS)分析,该区 Al 原子数分数分别为 2.19%和 3.9%。由 Fe-Al 二元相图可知,在 Fe 的一侧,存在很大延伸度的 Al 在 α -Fe 中的固溶区^[12],推测此过渡区是 Al 与 α -Fe 中形成的固溶体区,该固溶体具有体心立方晶格(α -Fe)。

图 4(e),(f)为钎接区界面。对比发现,在两者钎接区界面上均有很薄一层金属间化合物生成,靠近钢板一侧的金属间化合物的边缘较为平直,而靠近铝合金焊缝的一侧则参差不齐,这表明焊接时金属间化合物层是由钢板向液态金属一侧生长的。低能量密度焊接时,由于热输入量较小,钎接区焊缝内部组织均匀如图 4(e),由 Al-Si 二元相图可知,这些组织分别是 α (Al)基体和 Al-Si 共晶体,其中颜色较浅的为 α (Al),深色的为 Al-Si 共晶体。这些细小的 Al-Si 共晶体能提高熔池的流动性,有利于焊缝的铺展。高能量密度焊接时,则发现了粗大针状的化合物分布在 α 铝基体上[如图 4(f)],经 EDS 分析该化合物为金属间化合物 FeAl,这种组织的出现会降低接头的机械性能。

图 4(g),(h)为焊缝内部组织,对比发现能量密度不同焊缝内的组织形貌不相同。低能量密度焊接时[图 4(g)]组织仍然呈均匀的 α (Al)基体和细小的 Al-Si 共晶体,而高能量密度焊接时内部除了 α (Al)基体外,还出现了暗色块状结构,经 EDS 点分析得出,该块状物质为金属间化合物 FeAl。产生的原因是:高能量密度时,钢板熔化量增大了,此时熔池搅拌作用很强,部分熔化的 Fe 原子便在搅拌作用下运动到焊缝内部,由 Fe-Al 相图可知,在 1310 °C 时发生包晶反应 $L + \alpha(\text{Fe}) \rightarrow \alpha_2(\text{FeAl})$,FeAl 直接从熔体中生成,因此形成了块状金属间化合物 FeAl。

图 4(i),(j)为铝母材熔合线附近的组织,比较得到两者有较大差别。低能量密度时熔合区附近生成了柱状 α (Al)和 Al-Si 共晶相。而高能量密度时,在铝合金母材熔合线附近出现了细小的黑色点状物,经 EDS 分析,该区域含有 FeAl_3 。

3.3 焊缝各物相

图 4(c),(d)中熔化区正下方存在过渡区,经鉴定为 Al 与 α -Fe 形成的固溶体。另外焊缝熔化区界面处金属间化合物层上、下的组织从光学显微镜的观察图片看出具有较大的差别,有必要对之进行物相分析,分析分别针对低能量密度参数($2.16 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$)[图 5(a)]及高能量密度参数($2.95 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$)[图 5(b)]下的焊接接头进行。

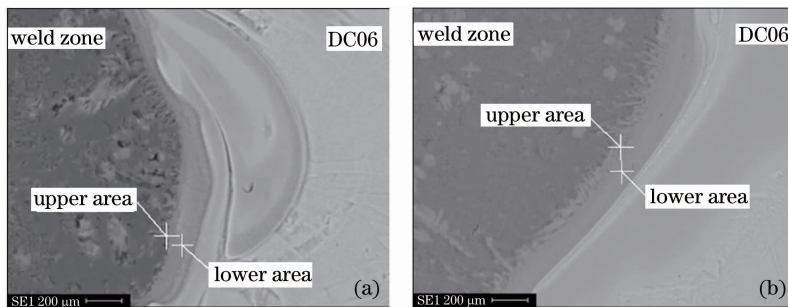


图 5 接头熔化区界面处金属间化合物层形貌

Fig. 5 Morphology of the intermetallic layer in joint interface

低能量密度参数下焊缝 EDS 测试结果显示,金属间化合物层上部 Al 原子数分数为 42.25%,而 Si 元素含量几乎为 0,由 Fe-Al 二元合金相图推断此处的物相为 FeAl。而金属间化合物层下部 Al 原子数分数为 11.15%,Si 原子数分数为 0.42%,由 Fe-Al 二元相图推断,该处元素分布处于相图中的固溶体特殊分层区 K 区,即 Al 在 α -Fe 中的固溶区,所以此处物相为 Al 与 α -Fe 形成的固溶体。

金属间化合物层不同位置的物相有很大差异,原因是化合物层的上部靠近铝,此处 Al 原子数分数较

高,但是 Al 在 Fe 中的溶解度不超过 22%,富余的 Al 元素与 Fe 形成了 FeAl 金属间化合物;Al 元素向界面扩散量较小,金属间化合物层下部靠近钢的一侧 Al 原子数分数较低,没有超过室温时 Al 在 Fe 中的溶解度,于是这些 Al 与 Fe 以固溶体的形式存在,所以界面层的上部和下部形成了不同种类的物相。

高能量密度参数下焊缝 EDS 对金属间化合物层上部进行的能谱分析显示,Al 原子数分数为 28.66%,结合 Fe-Al 二元相图推测,该区域的物相为 Fe_3Al ,这与上节中低功率时的物相不同,主要是因为热输入量增加使得 Fe 的扩散进一步加剧,提高了 Fe 的含量。金属间化合物层下部 Al 原子数分数为 16.21%结合 Fe-Al 二元相图,推测该区域的物相为 Al 与 Fe 形成的固溶体。这与低功率时相比没有变化,说明 Al 向 Fe 中的扩散程度变化不大。

采用高能量密度参数焊接时,焊缝内部发现一些灰色块状[图 6(a)]和条状[图 6(b)]的物质,对其进行 EDS 分析得到 Al 原子数分数为 30.42%,结合 Fe-Al 二元相图推测块状物的成分为 FeAl。此处产生该物质说明高能量密度焊接时,Fe 元素在扩散和熔池搅拌的共同作用下向焊缝内部运动很剧烈,大量的 Fe 元素被带到熔池内部。熔池凝固时,Fe 在 Al 中的溶解度急剧减小,剩余的 Fe 便与 Al 生成了金属间化合物 FeAl,这种物质的生成对接头性能带来了不利影响。

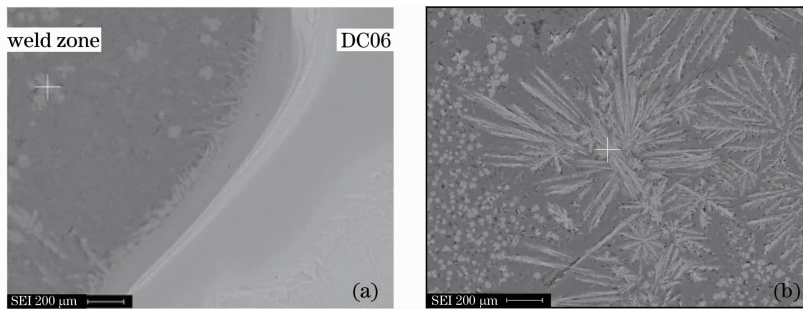


图 6 高能量密度参数下接头内部的组织形貌。(a)上部,(b)下部

Fig. 6 Morphology of joint interface with higher heat input. (a) upper area, (b) lower area

对铝合金母材融合线附近焊缝进行 EDS 分析,采用低能量密度参数焊接时此处 Al 原子数分数为 97.71%,Si 为 1.43%,结合 Al-Si 二元相图得出,此处以 α -Al 为主。采用高能量密度参数焊接时此处 Fe 原子数分数为 22.18%,根据 Fe-Al 二元相图推测该区域生成了大量的 $FeAl_3$ 金属间化合物,使其脆化,机械性能下降。该区域出现 $FeAl_3$ 仍然是由于 Fe 元素在扩散和熔池搅拌的共同作用下剧烈运动的结果,但相比钢一侧融合线处 Fe 原子数分数明显减少。

3.4 接头力学性能

采用低/高能量密度参数焊接时分别获得焊接试样 1[#] 和 2[#],将试样 1[#] 和 2[#] 制成 180 mm×20 mm 的条状,并使焊缝处于拉伸试样的中间,侧面经 800[#] 砂纸打磨光滑后制成拉伸试样,如图 7(a)和(b)。在室温(20 ℃)时在 810Material Test System 型电子万能试验机上以 1 mm/min 的速率进行拉剪试验。实验结果如图 7(c)和(d)所示。

1[#] 试样断裂位置发生在焊缝与钢板的结合处,试样最大抗拉剪力为 2.99 kN,可计算出其抗拉剪强度为 149.6 N/mm。2[#] 试样断裂位置在铝合金母材的融合线附近,最大抗拉剪力为 2.18 kN,计算抗拉剪强度为 108.8 N/mm,只有 1[#] 试样的 72.9%。而且,由图 5 可以看出,1[#] 试样经过了明显的塑性变形区,2[#] 试样的塑性变形区则非常小。这与该区域出现的大量 $FeAl_3$ 金属间化合物有关,高能量密度光束在焊缝中产生的搅拌扩散作用加强,加之高能量密度下熔化区熔化的 Fe 增加,Fe 元素更容易进入焊缝,形成金属间化合物增大焊缝融合区附近脆硬性倾向,减小其塑性韧性,使得该处机械性能低于焊缝与钢板结合处,拉伸试验中率先断裂

对不同功率焊缝进行显微硬度测试,如图 8 所示。靠近铝合金一侧焊缝硬度与母材相比变化不大,逐渐靠近测试点的 0 位置(金属间化合物层)时硬度突然增大。而且随焊接功率的增大 0 点位置硬度增大,2400 W 时硬度增大到 650 HV,远远超过母材。

硬度的提高主要是由于脆硬的金属间化合物所致,随热输入量的增加,焊缝中熔化的 Fe 元素增加,金

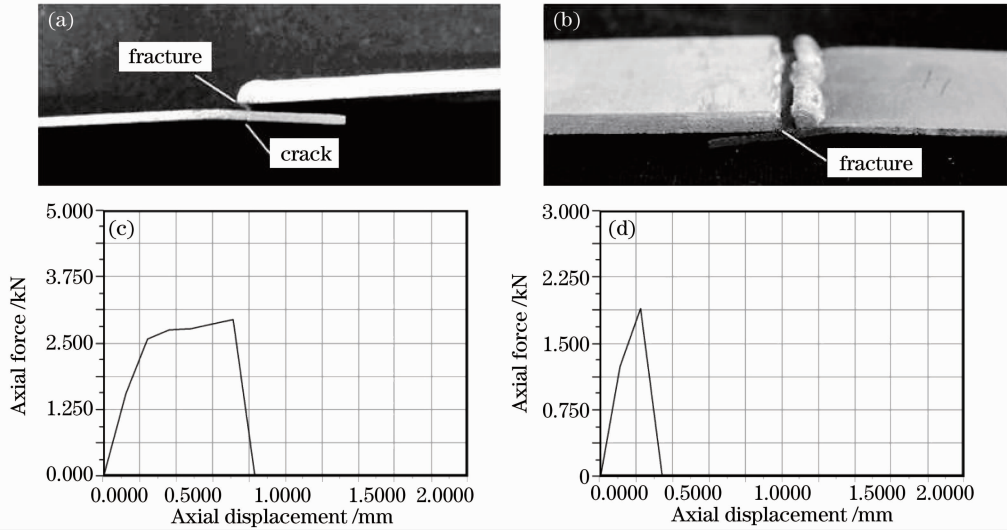


图7 1[#] (a)和2[#] (b)试样的拉剪试验接头断裂宏观形貌及1[#] (c)和2[#] (d)试样的应力应变曲线

Fig. 7 Fracture morphology of laser joints of (a) 1[#] and (b) 2[#] and tensile test curves of (c) 1[#] and (d) 2[#]

属间化合物的数量及层厚度增加,导致图中硬度和硬度的范围随功率的增大而增加。对焊缝性能的影响是使其塑性、韧性降低,脆硬倾向增加,使焊缝机械性能下降。因此,在焊接过程中必须严格控制热输入量,在保证焊丝熔合良好的情况下减少金属间化合物的生成,才能保证接头力学性能。

4 结 论

铝/钢 CO₂ 激光填丝焊接在低能量密度区及高能量密度区均能获得成形较好的焊缝。但低能量密度下,熔化区的界面上产生的金属间化合物厚度为 4.3 μm,钢板熔化区界面层主要物相是 FeAl 和 Al 与 α-Fe 形成固溶体,焊缝内部组织均匀以 α-Al 和 Al-Si 的共晶组织为主;高能量密度下,熔化区的界面上产生的金属间化合物厚度达到 9.04 μm,钢板熔化区界面层主要物相是 Fe₃Al 和 Al 与 α-Fe 形成的固溶体,焊缝内部出现很多块状或条状的金属间化合物 FeAl,严重影响接头机械性能。拉伸试验中高能量密度下获得的焊缝抗拉剪力仅为低能量密度下的 72.9%。

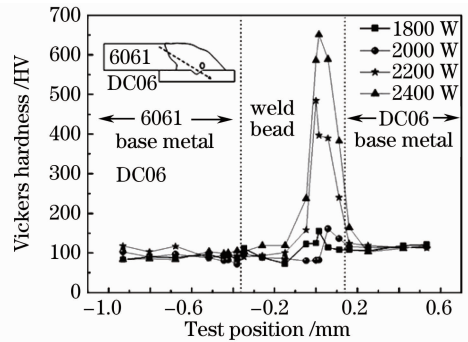


图8 不同激光参数下焊接接头的显微硬度分布
Fig. 8 Hardness distribution of dissimilar metal joints with different laser parameters

参 考 文 献

- Schubert E., Zerner I., Sepold G.. Laser beam joining of material combinations for automotive applications[C]. *SPIE*, 1997, **3097**: 212~221
- Bergmann H. W., Waldmann H., Guyenot M. *et al.*. Untersuchungsergebnisse Laserschweißen zum Al von Stahl auf AuXenhtautanwendungen[C]. European Automotive Laser Application, Bad Nauheim, Germany, Automotive Circle International, 2000
- Schubert E., Klassen M., Zerner I. *et al.*. Light-weight structures produced by laser beam joining for future applications in automotive and aerospace industry[J]. *Newspaper Mater Process Technol.*, 2001, **115**: 2~8
- Wagner F., Zerner I., Kreimeyer M. *et al.*. Characterization and properties of dissimilar metal combinations of Fe/Al and Ti/Al sheet materials[C]. Proceedings of the ICALCO'01, Jacksonville, USA, 2001(CD-OM)
- Shi Yan, Zhang Hong, Takehiro Watanabe *et al.*. CW/PW dual-beam YAG laser welding of steel/aluminum alloy sheets [J]. *Chinese J. Laser*, 2010, **37**(4): 1132~1137
- 石 岩, 张 宏, 渡部武弘 等. 连续-脉冲双激光束焊接钢-铝合金[J]. *中国激光*, 2010, **37**(4): 1132~1137

- 6 M. Geiger, H. Hanebuth, P. Hoffmann. Laserstrahlhartlöten von Blechformteilen mit dem Nd : YAG-Laser [C]. Präzisionsbearbeitung mit Festkörperlasern (Fügen), VDI Technologiezentrum Physikalische Technologien, Düsseldorf, 1996
- 7 Alexandre Martinieu, Rajashekar Shabadi, Alexis Deschamps *et al.*. Dissimilar material joining using laser aluminum to steel using zinc-based filler wire[J]. *Opt. Laser Technol.*, 2007, **39**(3): 652~661
- 8 H. Laukant, E. Wallmann. Fluxless laser beam joining of aluminium with zinc-coated steel[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2005, **10**(2): 219~226
- 9 Yu Gang, Zhao Shusen, Zhang Yongjie *et al.*. Research on key issues of laser welding of dissimilar metal[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2): 261~268
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
- 10 Chen Shuhai, Li Liqun, Chen Yanbing. Laser welding-brazing of Ti/Al dissimilar alloys joint with rectangle spot[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 2036~2041
陈树海, 李俐群, 陈彦宾. 矩形光斑钛/铝异种合金激光熔钎焊[J]. 中国激光, 2008, **35**(12): 2036~2041
- 11 Shanghai Institute of Machine Building Technology. Metallographic Analysis Technology [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Literature Publishing House, 1987: 727~728, 847~850
上海市机械制造工艺研究所. 金相分析技术[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1987: 727~728, 847~850
- 12 Feng Xiaosong. Study on Laser Brazing with Filler Wire for Galvanized Steel Sheets and Numerical Simulation of the Thermal Process[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007: 61~63
封小松. 镀锌钢板激光填丝钎焊工艺与热过程数值模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007: 61~63