

文章编号: 1001-3806(2015)06-0863-06

Al-Mg 系铝合金脉冲激光焊接性能影响因素分析

张继祥, 刘凤芝, 高 波, 殷筱依, 杨 泮

(重庆交通大学 机电与汽车工程学院, 重庆 400074)

摘要: 为了研究铝合金表面状态和焊接工艺方法对焊接接头性能的影响, 采用 Nd:YAG 脉冲激光器对 Al-Mg 系铝合金激光焊接方法进行了理论分析和实验验证, 得到了焊接接头性能实验结果。结果表明, 原始表面和碱蚀表面处理的试样焊接过程不稳定, 阳极氧化试样焊接中形成了稳定的小孔效应, 焊接过程较稳定; 阳极氧化、两面焊、填粉焊都能有效提高焊缝熔深和深宽比; 试样阳极氧化、双面焊、填粉焊可使焊缝抗拉强度提高 1 倍以上, 其中 Al-0.05Si 填粉焊提升效果最好; 表面处理试样硬度都有所提高, 磷酸阳极氧化提高效果最好。双面焊工艺使焊缝和熔合区硬度提高, 填粉焊焊缝中心硬度很低但熔合区硬度提高明显, 双面焊、填粉焊热影响区硬度低于单面焊。阳极氧化表面处理、双面焊工艺可以有效地改善 Al-Mg 铝合金的激光焊接性。

关键词: 激光技术; 表面状态; 焊接工艺方法; 铝合金

中图分类号: TG456.7

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2015.06.028

Affecting factors of pulse laser welding property of Al-Mg series aluminum alloy

ZHANG Jixiang, LIU Fengzhi, GAO Bo, YIN Xiaoyi, YANG Pan

(School of Mechatronics & Automotive Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: In order to study effect of aluminum surface state and welding processing on the properties of welding joints, the process of laser welding Al-Mg series aluminum alloy with Nd:YAG laser was analyzed in theory and verified in experiments. The experimental results of the characteristics of welding joints were obtained. The results show that welding process of untreated sample and alkali corrosion surface treatment sample are not stable while welding process of anodizing treatment sample is stable and hole effect is formed stably. Weld seam penetration and depth-to-width ratio are all improved effectively by the aid of anodizing, double welding and powder filling welding. The tensile strength of the weld seam of anodizing sample, double-sided welding sample and powder filling welding sample increases more than 1 times and powder filling welding sample of Al-0.05Si has the highest tensile strength. Hardness of all surface treatment samples is improved and the effect of phosphoric acid anodizing is the best. Hardness of weld seam and fusion zone is improved through double welding. Central hardness of powder filling weld is lower while hardness of fusion zone increases obviously. Hardness of heat affected zone of double welding and powder filling welding is lower than hardness of single side welding. The results show that anodic oxidation surface treatment and double-sided welding technology can improve the property of laser welding of Al-Mg series aluminum alloy effectively.

Key words: laser technique; surface state; welding process; aluminum alloy

引 言

铝合金具有密度小、比强度高、抗腐蚀性好、易于加工成型、抗冲击性能好、易回收、无磁等优点。铝合金被应用于建筑、航空航天、汽车、造船、健身娱乐压力容器等行业。随着铝合金越来越广泛的应用及构件形

状日趋复杂化, 对铝合金结构件之间的连接技术特别是对铝合金焊接工艺提出了越来越高的要求。传统熔焊方法已经难以适应其发展趋势, 质量好、效率高的铝合金焊接技术的开发和应用正逐渐成为生产中的迫切需求。

钨极惰性气体(tungsten inert gas, TIG)焊和金属惰性气体保护(metal inertia gas, MIG)焊、搅拌摩擦焊、电子束焊、激光焊是目前工业应用中最为常见的铝合金焊接方法。TIG 焊和 MIG 焊热输入量大、能量密度低、焊接速度慢、生产效率低、焊接接头性能差、焊接构件的变形比较大、焊后需进行校正; 搅拌摩擦焊仅适合于形状比较规则的焊缝, 较难焊接复杂形状工件, 设备投入大; 电子束焊常用于铝合金厚板的焊接, 焊缝产生

基金项目: 重庆市基础与前沿研究计划资助项目(cstc2013jcyjA70015); 重庆市教育委员会科学技术研究资助项目(KJ080407)

作者简介: 张继祥(1971-), 男, 博士, 副教授, 主要从事有色金属加工方向的研究。

E-mail: jixiangzhang@163.com

收稿日期: 2014-09-24; 收到修改稿日期: 2014-12-01

下塌、凹坑缺陷,焊件尺寸受真空室限制;而铝合金激光焊接具有能量密度高、热输入量小易于精确控制、定位精度高、焊件热变形小、熔合区和热影响区窄、焊缝熔深大、深宽比大的优点,因此大功率激光器常用于铝合金厚板焊接,小功率 Nd:YAG 激光器常用于薄板的焊接^[1-4]。

目前学者们进行了许多关于铝合金表面处理状态及填粉焊接对激光焊接过程及接头组织性能的影响研究^[5-14]。如 CAI 等人^[7]试验得出不同表面状态对结晶裂纹的影响与焊缝组织晶粒大小、共晶形态及其数量密切相关。CHEN 等人^[8]进行了高强铝合金的 CO₂ 激光填粉焊接研究,结果表明,合金粉末可以提高焊接过程中激光能量的有效利用率和减弱等离子体的膨胀跳

动,有利于获得较为稳定的焊接过程和理想的焊缝成形。YU 等人^[12]对 5A06 铝合金的激光填丝焊接接头组织性能进行研究,测得其焊接接头的断裂强度、韧性、延伸率均有所降低。

本文中采用 Nd:YAG 脉冲激光器针对激光焊接存在的焊接过程不稳定、焊缝深宽比小、力学性能低的难点,通过改变表面状态和工艺方法,研究其对铝合金焊接工艺性的影响机理,达到提升其焊接性能的目的。

1 实验

1.1 实验用原材料

实验中所用的焊接母材为 Al-Mg 合金中的 5451, T6 状态,其化学成分见表 1,力学性能见表 2。

Table 1 Mass fraction of aluminum alloy 5451

w(Mg)	w(Fe)	w(Cr)	w(Si)	w(Cu)	w(Mn)	w(Zn)	w(Ni)	w(Ti)	w(Al)
0.023	0.0024	0.0021	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	balance

Table 2 Physical and mechanical properties of aluminum alloy in the experiment

material	strength of extension σ_b /MPa	micro-hardness/ HV	elongation δ /%	density/ (g · cm ⁻³)
5451 aluminum alloy	245	94	10	2.7

1.2 试样的准备

将铝合金板材用线切割机切割成尺寸为 50mm × 20mm × 2.5mm 试样,并对试样表面进行除油去氧化膜处理,具体步骤如下:酒精清洗;0.10NaOH 溶液浸泡;清水清洗;0.30HNO₃ 溶液光化处理;清水清洗;酒精擦拭、烘干。

先对部分试样进行 NaOH 溶液碱蚀处理,再对另外一部分试样进行阳极氧化处理。阳极氧化处理分别采用硫酸和磷酸,其浓度以及氧化参量和氧化后膜层的表观特征见表 3。

Table 3 Parameters of anode oxidation electrolyte

electrolyte composition	electric current density/ (A · dm ⁻²)	voltage /V	temperature /°C	time/min	anodic oxidation film color
sulphuric acid H ₂ SO ₄ 20%	direct current power, 1 ~ 2	20	10 ~ 20	30	transparency
phosphoric acid H ₃ PO ₄ , 100g/L	direct current power, 1.3 ~ 4.0	30	10 ~ 20	30	transparency or white

1.3 焊接实验

将所有试样在 JHM-1GY-500B 型 Nd:YAG 多功能激光加工机上进行对焊实验。首先进行表面处理状态对铝合金焊接性影响的研究,重点是试样表面处理后提高激光吸收率,改善铝合金焊接性的研究。表 4 为

Table 4 Surface treatment status

sample number	surface state	treatment alkaline degreasing
A ₁	original surface	—
A ₂	alkaline degreasing	degreasing, oxide film removing and 30g/L NaOH solution corrosion for 30min at room temperature
A ₃	sulfuric acid anodizing	degreasing, oxide film removing and direct current sulfuric acid anodizing
A ₄	phosphoric acid anodizing	degreasing, oxide film removing and direct current phosphoric acid anodizing

试样表面处理方法。焊接过程为:采用纯度在 99.9% 以上的纯氩气作为焊接保护气体,保护方式为侧保护 + 背面保护,流量控制 5L/min 激光热源沿被焊工件的焊缝只走一遍。

然后进行不同工艺方案焊接对比实验,所采用的工艺方案如表 5 所示。

Table 5 Different projects of welding process

sample number	process scheme	welding process
B ₁	one side welding	laser welding only once
B ₂	welding by both sides	after welding of the one-side flip of welding workpieces, use the same laser welding parameters and the same starting point to weld the back of welding seam
B ₃	preset Al-0.05Mg powder	before welding, put the Al-0.05Mg alloy powder on the surface of welding workpieces
B ₄	preset Al-0.05Si powder	before welding, put the Al-0.05Si alloy powder on the surface of welding workpieces

1.4 力学性能试验

1.4.1 拉伸试验 将各焊接好的工件,分别用线切割机沿着垂直于焊缝的方向进行拉伸试样的切割,试样具体尺寸如图 1 所示,试样原始标距为 50mm,宽度为

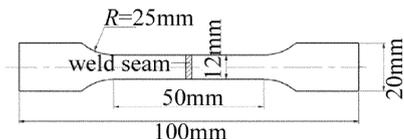


Fig. 1 Dimension of tensile specimen

12mm。试样在万能实验机上以 0.3mm/s 的速率进行拉伸,记录各拉伸试件的最大断裂值和拉伸变形曲线。

1.4.2 硬度检测试验 用线切割机沿着垂直于焊缝方向将焊接件切割成 10mm × 10mm 的试样,将各试样做好标记后统一装夹在自制的夹具上进行硬度测量。

在室温下,将装夹好的工件在 HXD-1000TM/LCD 型显微硬度机上,从焊缝中心开始分别向焊缝两边进行硬度测量,每个点测量 3 次取平均值,其中测量时的加载 29.4N 载荷,保持时间为 5s。

2 结果与讨论

2.1 表面状态对铝合金焊接性的影响规律

2.1.1 焊接过程 铝合金原始表面和碱蚀表面处理的试样焊接时表现为不连续的蓝色火焰并伴随着强烈的金属蒸汽喷发声,如图 2a 所示,焊接过程不稳定,等离子体约为 0.8cm ~ 1cm。从侧面可以看出,火焰很少透射到工件的下表面,表示此时焊接没有形成有效的小孔,焊件未焊透。

硫酸、磷酸阳极氧化的试样焊接时表现为在熔池内为比较稳定的深蓝色,产生断续的黄色火焰的情况

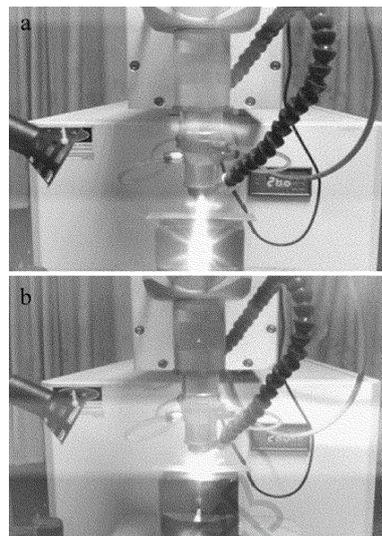


Fig. 2 Changing of weld pool morphology and color in welding process a—discontinuous yellow flame b—the stability of continuous blue flame 明显降低,等离子体高度约为 0.5cm,焊接过程较稳定。从侧面可以看出,稳定的蓝色火焰透射到工件的下表面,说明此时焊接过程形成了稳定的小孔效应。

以上结果初步说明,表面未经处理或碱蚀的试样对激光吸收率低,产生的焊接热不足,只能以传热焊方式进行;而硫酸、磷酸阳极氧化的试样提高了激光吸收率,焊接以小孔深熔焊方式进行。

2.1.2 焊缝深宽比 对各种表面状态下焊接后的试样端面焊缝进行测量,得到焊缝的宽度、深度并计算得到焊缝的深宽比,如图 3 所示。

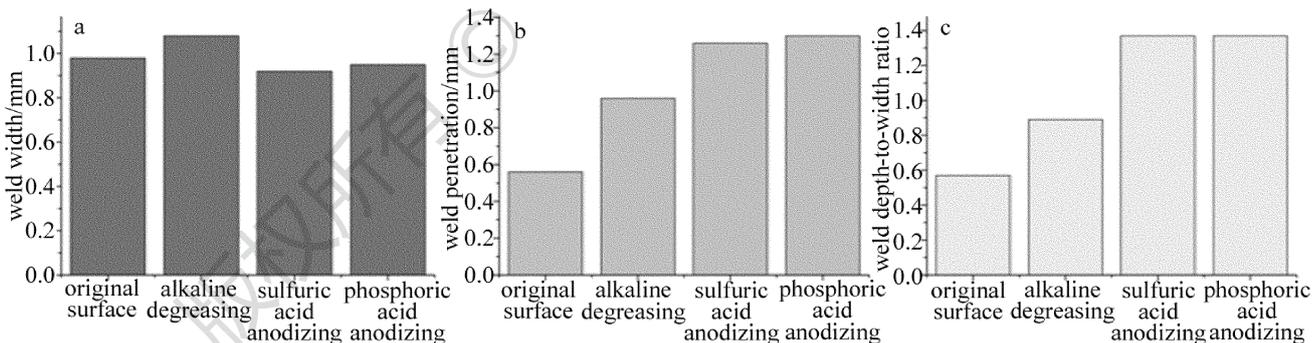


Fig. 3 Effect of surface state on weld parameters

a—weld width of different surface statement b—penetration of different surface statement c—weld seam depth-to-width ratio of different surface statement

不同表面状态下的焊缝熔宽相差并不大,基本都在 1.0mm 左右,经阳极氧化处理的工件熔宽稍小,而焊缝熔深则有较大的差别,表面没经过处理的试样焊缝熔深较小,而酸蚀试样熔深较大,其中经磷酸阳极氧化处理后,其焊缝熔深可达 1.3mm。从图 3c 焊缝深宽比来看,表面没经过处理的试样深宽比较小,焊缝状态较差(如图 4a 所示),而经过酸蚀的试样深宽比较大(如图 4c 和图 4d 所示)。

焊缝的熔深和深宽比反映了焊缝吸收功率密度的大小,这是由铝合金对激光吸收率决定的。阳极氧化

表面处理可以增加激光利用率,焊缝吸收功率密度大,产生的焊接热量高,使焊缝熔深和深宽比大,而未经处理的试样和碱蚀试样表面对激光吸收率低,焊缝熔深和深宽比小。

铝合金对激光的吸收率与其表面状态有直接关系。如图 5 所示阳极氧化的表面粗糙,有裂纹、不规则形状的多孔结构。激光在小孔内多次反射有助于铝合金对光束能量的吸收,显示出“壁聚焦效应”。凹凸不平的铝合金表面和裂纹使得阳极氧化后的铝合金表面比光滑的表面激光吸收率大。激光吸收率的差异造成

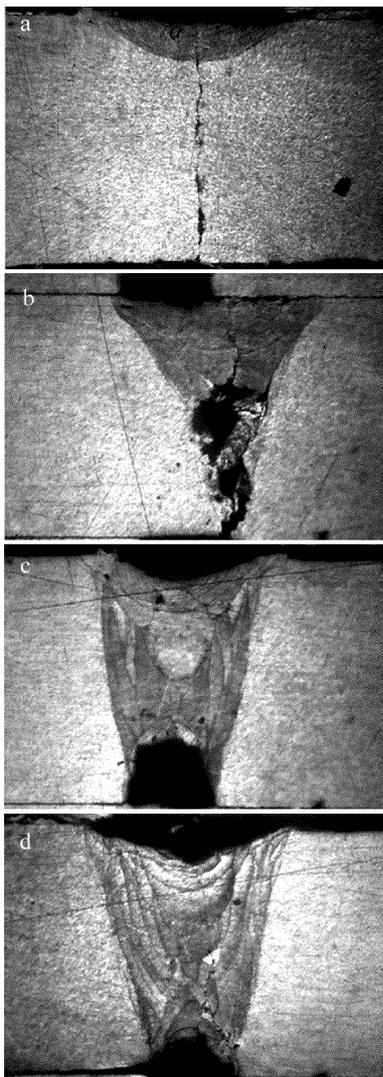


Fig. 4 Weld cross section under different surface state

a—original surface b—alkaline degreasing c—sulfuric acid anodizing
d—phosphoric acid anodizing

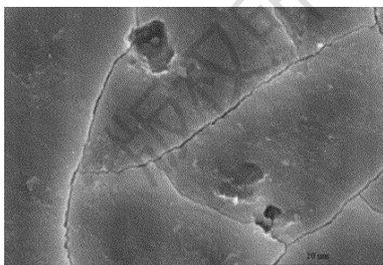


Fig. 5 Surface morphology of aluminum alloy anodic oxidation film

了合金表面吸收功率密度的差异,引起焊接模式发生了转变。经过阳极氧化的表面大大增加了激光吸收率,使原本的传热焊向小孔深熔焊过渡。

2.1.3 焊缝力学性能 图 6a 为不同表面处理试样焊缝抗拉强度。未进行表面处理的试样焊缝抗拉强度最低,仅有 32.5MPa,试样经过表面处理后焊缝抗拉强度有所提高,经硫酸、磷酸阳极氧化的试样焊缝抗拉强度提高了近 1 倍,分别达到 61.3MPa 和 64MPa。但也应

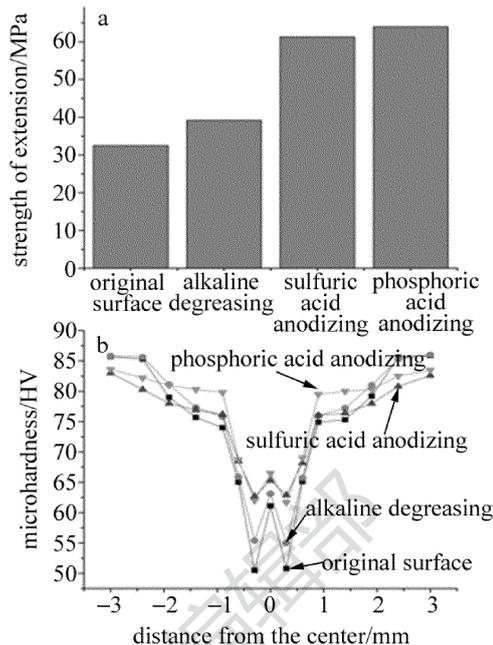


Fig. 6 Mechanical property of welding pieces under different surface states

a—tensile strength of weld b—hardness of weld

该看到,虽然经过表面处理后焊缝强度有所提高,但是最大的焊缝强度也只有材料本身强度的 1/4。

铝合金激光焊缝抗拉强度低与合金对激光吸收率低有直接关系。低的激光吸收率使焊缝吸收功率密度低,焊缝熔化温度低、熔深小,造成焊缝组织不致密及熔合区存在熔合缺陷,因此铝合金焊缝激光焊强度偏低。经过表面处理后的试样对激光吸收率提高,其焊缝强度明显提高。探索更好地提升激光吸收率的表面处理工艺是下一步研究的方向。

图 6b 为试样焊缝中心及热影响区硬度曲线。所有曲线从焊缝中心向焊缝两边的硬度分布近似呈 W 型。对于未经表面处理的试样,焊缝中心硬度 HV61,约为母材硬度的 65%,而距焊缝中心 0.5mm 的熔合区硬度很低,只有 HV50 左右;进入热影响区后硬度随距焊缝中心距离增加而快速增加到母材硬度的 80% 左右(约 HV75),然后减缓增加到母材硬度。

焊缝及其热影响区的硬度主要与焊缝晶粒组织的大小、晶内溶质元素含量的高低、焊缝内 Mg_3Al_8 相数量的多少和尺寸的大小等因素有关。焊缝 Mg 合金使合金中的 Mg_3Al_8 共晶相含量降低,致使焊缝硬度的下降;熔合区由于熔合缺陷,组织不致密,硬度最低,因此拉伸试样往往在熔合区断裂。

热影响区的软化主要是 $\alpha(Al)$ 相晶粒长大及 Mg_3Al_8 相的溶解或长大造成的,且靠近熔合线的区域发生 Mg_3Al_8 相的溶解,远离熔合线的区域发生 Mg_3Al_8 相的长大。

从图 6b 中还可以看出,3 种经过表面处理后的试样焊缝及过热区的硬度明显提高,尤其是硫酸、磷酸阳极氧化的试样提高明显。硫酸、磷酸阳极氧化的试样焊缝基本贯穿试样,其散热条件为双面辐射散热,散热效果好,焊后冷却速度更大,使焊缝和过热区的晶粒细化,硬度提高。

铝合金激光焊焊缝强度的降低也与其合金元素的烧损有关。图 7 为原始表面焊缝及热影响区镁含量的扫描曲线,可以看出,在焊缝区由于镁的烧损,使 Al-Mg 合金中的 Mg_3Al_8 共晶相含量降低,致使焊缝强度的下降。另外,T6 处理的母材原始组织为固溶时效组织,而焊缝组织为铸态组织,组织的不同也会使其强度降低。

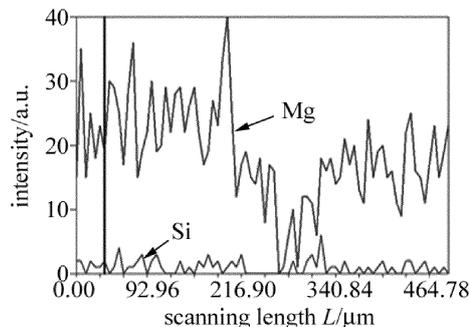


Fig. 7 Alloy distribution curve in the weld seam

2.2 焊接工艺方案对铝合金焊接性的影响规律

2.2.1 焊缝深宽比 对不同焊接工艺条件下焊接后的试样进行测量,得到焊缝的宽度、深度并计算得到焊缝的深宽比,如图 8 所示。

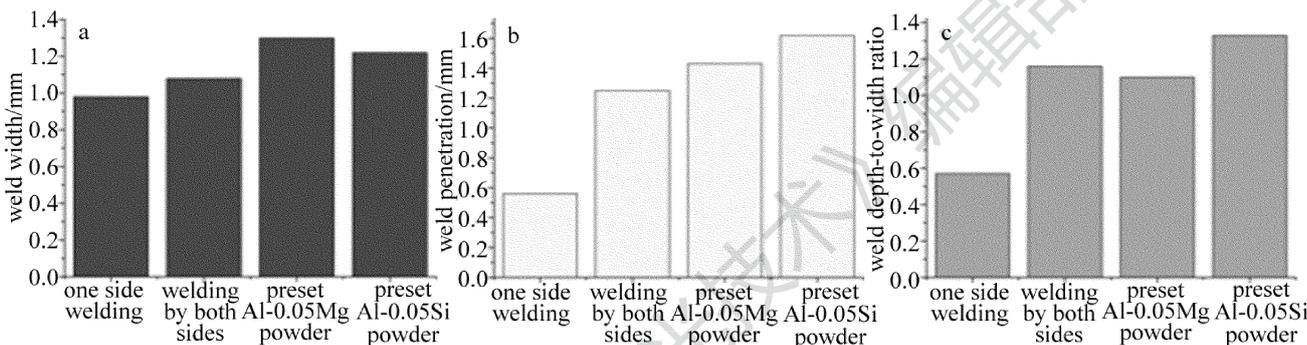


Fig. 8 Size of welding seam under different welding process

a—weld width of different welding process b—penetration of different welding process c—weld seam depth-to-width ratio of different welding process

焊接工艺方案对焊缝的熔宽影响不大,但对熔深的影响明显。两面焊、填粉焊接都能有效的提高焊缝的熔深和深宽比,双面焊可以使熔深增加 1 倍,而 Al-0.05Mg 填粉单面焊使焊缝熔深增加更明显。其中,Al-0.05Si 增加焊缝熔深和深宽比效果最好。与图 3 相比,填粉焊接比试样表面处理增加熔深、提高深宽比效果更好。

参考文献[15]中也指出,添加合金粉末改变了对激光的吸收方式,熔池获得的激光能量增加,合金粉末可以直接吸收激光能量还吸收由母材表面反射的激光能量或者将其反射回材料表面。添加合金粉末使激光有效利用率大大提高,改善焊缝成形,使焊缝熔深增加。

2.2.2 焊缝力学性能 图 9a 为不同焊接工艺方案的焊缝抗拉强度。可以看出,采用双面焊、填粉焊接都能使焊缝抗拉强度提高 1 倍以上,尤其是 Al-0.05Si 填粉焊接提升焊缝抗拉强度效果最好。与图 6 相比,双面焊及 Al-0.05Mg 填粉焊比表面处理焊缝强度稍高,而 Al-0.05Si 填粉焊缝强度明显提高。

双面焊强度增加的原因是第 2 道次焊接对第 1 道次焊缝热处理作用,使熔合区缺陷减少,强度增加。Al-0.05Mg 填粉焊使焊缝烧损的 Mg 元素得到有效的

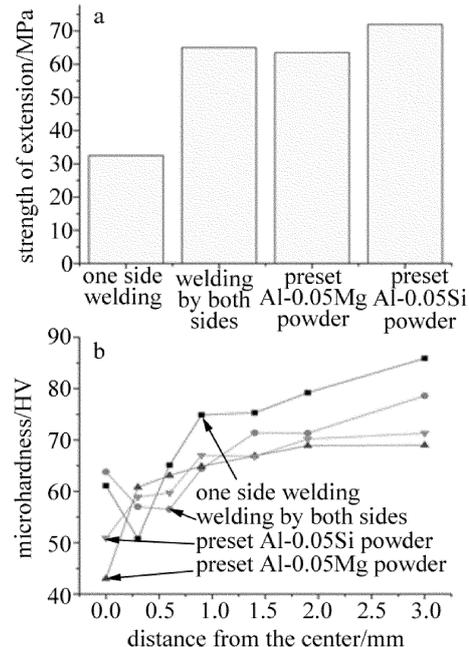


Fig. 9 Mechanical properties of welding pieces under different welding process

a—tensile strength of weld b—hardness of weld

补充,Mg 能显著地提高合金的强度,合金中出现更多的 $\alpha(Al)$ 与 Mg_3Al_8 共晶体,另外,Al-0.05Mg 填粉有效地提高了激光吸收率,熔深增加,熔合区熔合效果好,

缺陷减少,这些因素都能有效地使焊件抗拉强度增加。Al-0.05Si 填粉焊由于 Mg 元素的烧损和 Si 元素的增加,焊缝成分更接近于 4000 系 Al-Si 合金,生成片状 α (Al) 固溶体和 α (Al)-Si 共晶体(共晶点 12.6%),也有 β (Al₅FeSi) 相存在,另外,Al-0.05Si 填粉焊有效地提高了激光吸收率,熔深增加,熔合区熔合效果好,缺陷减少,这些因素都能有效地使焊件抗拉强度增加。

图 9b 为不同焊接工艺方案的焊缝硬度。双面焊焊缝硬度比单面焊稍有提升,但熔合区硬度有明显提高。填粉焊接硬度变化趋势与其它完全不同,焊缝硬度很低,但到熔合区硬度大幅提高。热影响区从融合线到母材硬度逐渐增加,但双面焊、填粉焊热影响区的硬度明显低于单面焊。

双面焊第 2 道次焊接对第 1 道次有热处理作用,在此过程中促进了 Mg₃Al₈ 固溶,在随后的弥散析出后焊缝和熔合区硬度相应提高,另外,第 2 道次促进第 1 道次熔合区扩散,使熔合区组织均匀致密,硬度提高。填粉焊接提高激光吸收率,熔池温度高,结晶晶粒粗大,因此焊缝硬度降低。也是由于填粉焊接提高激光吸收率,熔合区熔化效果好,组织更致密,另外,由于 Mg 在液态铝中溶解度比固态铝溶解度大所以焊接过程中 Mg 由固态铝向液态铝扩散,而边缘处和熔池底部 Mg 蒸发少,所以熔合线附近 Mg 含量高于焊缝中心,所以熔合线附近硬度高^[16]。热影响区的软化主要是 α (Al) 相晶粒长大及 Mg₃Al₈ 相的溶解或长大造成的,由于双面焊、填粉焊接都增加了激光吸收率,热影响区温度高,热影响区软化更明显。

3 结 论

(1) 铝合金原始表面和碱蚀表面处理的试样焊接过程不稳定,焊件未焊透;硫酸、磷酸阳极氧化的试样焊接过程较稳定,焊接过程形成了稳定的小孔效应。(2) 不同表面状态下的焊缝熔宽都在 1.0mm 左右,阳极氧化试样焊缝熔深和深宽比增大;两面焊、填粉焊接都能有效提高焊缝熔深和深宽比,Al-0.05Si 增加效果最好。(3) 原始表面的试样焊缝抗拉强度 32.5MPa,碱蚀试样强度为 39.2MPa,阳极氧化的试样和双面焊、填粉焊焊缝抗拉强度提高 1 倍以上,Al-0.05Si 填粉焊提升焊缝抗拉强度效果最好为 72MPa。(4) 表面处理试样焊缝和熔合区硬度都有所提高,磷酸阳极氧化试样提高明显,其焊缝中心硬度为 66.5HV,熔合区硬度分别为 62HV,热影响区后硬度随距焊缝中心距离增加至母材硬度。双面焊焊缝硬度高于单面焊焊缝硬度为 63.8HV;填粉焊焊缝硬度降低,Al-0.05Mg 填粉焊硬度最低为 43HV;3 种工艺熔合区硬度均高于单面

焊,Al-0.05Mg 熔合区硬度最高为 60.8HV;双面焊、填粉焊热影响区的硬度明显低于单面焊。

参 考 文 献

- [1] CAO L J, ZHANG Ch M. CO₂ laser welding process and weld shaping of 5A02 aluminum alloys[J]. Welding Technology, 2010, 39(9):35-38(in Chinese).
- [2] SUN F J, WEI H K. Technology of laser welding on Al-5Mg-0.3Sc [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(3): 10-12(in Chinese).
- [3] DAI J J. Research progress on technological properties of laser welding of aluminum alloys [J]. Electric Welding Machine, 2010, 40(3):20-23(in Chinese)
- [4] ZHAO H, WHITE D R. Current issue and problems in laser welding of automotive aluminum alloys [J]. International Materials Reviews, 1999, 44(6):238-266.
- [5] GAKU K, SHIGERU Y, KENZO N, et al. Fundamental study about CO₂ laser welding of titanium aluminide intermetallic compound [J]. Proceedings of the SPIE, 2000, 4088: 287-290.
- [6] WANG Y R, ZHANG Zh D, FENG J C, et al. Effects of surface conditions on spot welded joint of magnesium alloy [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2004, 25(3):27-30(in Chinese).
- [7] CAI H, KONG X F, XIAO R Sh. Effect of surface status on microstructures and solidification cracking susceptibility in laser beam welding of 2524 aluminum alloy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(2):0203002(in Chinese).
- [8] CHEN K, XIAO R Sh, ZHANG Sh H, et al. CO₂ laser welding process of aluminum alloy with filler powder [J]. Transactions of The China Welding Institution, 2006, 27(10):33-36(in Chinese).
- [9] XU F, LI X Y, YANG J, et al. Laser welding process of 5A06 aluminum alloy with filler wire [J]. Welding & Joining, 2008(8):26-28(in Chinese).
- [10] SÁNCHEZ-AMAYA J M, DELADO T, GONZÁLEZ-ROVIRA L, et al. Laser welding of aluminium alloys 5083 and 6082 under conduction regime [J]. Applied Surface Science, 2009, 255(23): 9512-9521.
- [11] ALSHAER A W, LI L, MISTRY A. The effects of short pulse laser surface cleaning on porosity formation and reduction in laser welding of aluminium alloy for automotive component manufacture [J]. Optics & Laser Technology, 2014, 64:162-171.
- [12] YU Y Ch, WANG Ch M, YU Sh F. Microstructures and property of butt laser joints of aluminium alloy 5A06 sheets with filler [J]. Laser Technology, 2010, 34(1):34-36(in Chinese).
- [13] LIU Sh H, LIU J L, LIU H, et al. AZ91 magnesium alloy welding based on YAG pulsed laser [J]. Laser Technology, 2010, 34(4): 459-462(in Chinese).
- [14] ZOU Y F, JIN X Z, HE Y N, et al. Study on improving mechanical properties of the welds by filling magnesium powder during laser welding 5052 aluminum alloy [J]. Laser Technology, 2013, 37(6): 712-717(in Chinese).
- [15] ZHANG Sh H, CHEN K, XIAO R Sh, et al. Influence of metal powder on high power CO₂ laser welding of aluminum alloy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(6):860-863(in Chinese).
- [16] NIU R F, LIN B H, WANG Y N, et al. Evaporation loss of Mg element in pulsed laser welding of 5A05 aluminum alloy and distribution of micro-hardness of welding joint [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(3):81-84(in Chinese).