

异种铝合金激光诱导电弧拼焊接头塌陷研究

宋刚*, 符成学, 于培妮, 刘黎明

大连理工大学材料科学与工程学院, 辽宁省先进连接技术重点实验室, 辽宁 大连 116024

摘要 采用激光诱导 TIG 电弧焊方法进行了 1.5 mm 厚 6061-T6 和 5083-O 异种铝合金的拼焊试验, 系统研究了激光的加入对焊接接头塌陷变化和力学性能的影响规律。结果表明: 由于两种铝合金的化学成分和热物理性能的差异, 焊接接头会出现不一致的塌陷现象; 与电弧焊相比, 激光的加入不仅可以有效降低焊接接头的塌陷程度, 还会大幅降低焊接接头塌陷深度比的不一致程度; 随着激光功率增大, 焊接接头塌陷的不一致程度呈减小的趋势, 导致接头受力情况发生变化, 使接头强度呈先增后减的趋势。

关键词 激光技术; 激光诱导电弧焊; 异种铝合金; 薄板拼焊; 不一致塌陷

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1002007

Joins Collapse of Dissimilar Aluminum Alloys During Laser-Induced Arc Welding

Song Gang*, Fu Chengxue, Yu Peini, Liu Liming

School of Material Science and Engineering, Dalian University of Technology, Key Laboratory of Liaoning Advanced Welding and Joining Technology, Dalian, Liaoning 116024, China

Abstract Laser-induced TIG arc welding is used to weld 1.5-mm dissimilar aluminum alloys 6061-T6 and 5083-O to systematically study the influence of the addition of a laser on the collapse and mechanical properties of welded joints. We find that the welded joints appear inconsistent owing to the difference in chemical compositions and thermophysical properties of the two aluminum alloys used. Compared with traditional arc welding, the addition of a laser can not only effectively reduce the degree of collapse of the welded joint, but also greatly reduce the inconsistent collapse depth ratio of the welded joint. Moreover, the inconsistent collapse of the welded joints shows a decreasing trend with the increasing laser power used for welding. It causes the joint stress to change; therefore, the joint strength first increases and subsequently decreases.

Key words laser technique; laser-induced arc welding; dissimilar aluminum alloys; thin plate tailor welding; inconsistent collapse

OCIS codes 140.3390; 140.3538; 350.3390

1 引 言

汽车给人们生活带来了便利的同时也带来了严重的环境和能源问题, 为解决这一问题, 汽车轻量化技术成为各研究机构关注的焦点^[1-4]。

汽车轻量化的途径主要包括汽车结构的优化设计^[5]、新型轻质材料的应用比例提升^[6]、新型制造工艺的应用^[7-8]。汽车车身制造中的拼焊板技术——先拼焊后冲压成零件的工艺, 由于具有减少零件数

量、提高整体结构刚度、提升材料利用率、降低成本等优势, 已成功应用于钢结构车身零件的批量制造中^[9-10]。铝合金由于具有良好的力学性能和较高的耐腐蚀性能而被一致认为是汽车轻量化过程中替代钢的理想材料^[11]。异种铝合金拼焊板技术既可满足车辆不同部位不同的性能要求, 又兼具生产效率高和节约原材料等优点, 因此, 研究异种铝合金的拼焊板技术具有很强的前瞻性和实用性。

铝合金薄板不填丝焊要先加热熔化后再冷却凝

收稿日期: 2019-01-25; 修回日期: 2019-05-18; 录用日期: 2019-06-13

基金项目: 国家自然科学基金(U1764251)

* E-mail: songgang@dlut.edu.cn

固,焊接接头难免会出现塌陷现象,这将严重影响拼焊接头的性能及其后续冲压成型的能力^[12]。杨璟^[13]的研究表明,在铝合金激光焊接过程中,当重力和金属蒸气压力之和大于熔池背部的表面张力时,熔池下凹严重,产生塌陷缺陷。Ancona 等^[14-15]研究了工艺参数对 AA5083 铝合金激光对接接头焊缝塌陷的影响,发现焊接速度对塌陷程度的影响最大。Kim 等^[16]认为在铝合金的搅拌摩擦焊过程中,塌陷的存在会对接头的力学性能和成形性能具有较大影响,考虑塌陷的模拟结果与实验结果更吻合。张健等^[17]研究了 3 mm 厚 2124 铝合金在激光拼焊中激光离焦量对焊缝塌陷的影响,发现合适的激光离焦量可有效改善接头的塌陷现象。上述研究多是对同种铝合金焊缝的塌陷现象进行研究,而对异种铝合金焊缝塌陷的研究比较少。

激光诱导非熔化极惰性气体保护焊(TIG)是一种低功率脉冲激光辅助增强电弧的复合焊接技术,可在较低的能耗下得到优质高效的焊接接头。本文采用激光诱导 TIG 技术对 6061-T6(以下简称“6061”)和 5083-O(以下简称“5083”)异种铝合金薄板进行拼焊,分析了焊接接头塌陷形成的原因、焊接参数对焊接接头塌陷的影响规律以及塌陷对焊接接

头力学性能的影响,为异种铝合金拼焊板技术的开发提供技术支撑。

2 试验材料和方法

试验材料为 6061 和 5083 铝合金,尺寸为 100 mm×60 mm×1.5 mm,材料成分如表 1 所示。采用自行搭建的低功率脉冲激光诱导电弧复合焊接系统进行焊接试验。焊接系统所用激光器是波长为 1.064 μm 的脉冲 Nd:YAG 激光器,焦距为 100 mm,焦点光斑直径为 0.6 mm。采用交流 TIG 电弧,以纯氩气作为保护气体,采用激光在前、电弧跟后的焊接方式,焊接装置示意图如图 1 所示。焊前用钢丝刷和砂纸打磨,以去除铝合金板表面的氧化膜,用酒精溶液去除表面的油污,清理后在 24 h 内完成焊接,避免母材被再次氧化。根据大量前期实验经验,依据在保证获得连续均匀的焊缝的前提下提高焊接生产效率的原则,选取表 2、表 3 所示的焊接参数。

根据 GB/T 228—2002《金属材料室温拉伸试验方法》,用线切割方法截取标准拉伸试样,采用万能拉伸试验机测试接头的静拉伸力学性能,拉伸试样尺寸如图 2 所示。抗拉强度取同一参数下 3 个试样的算术均值。

表 1 试验用铝合金的化学成分

Table 1 Chemical compositions of aluminum alloy to be tested

Material	Mass fraction / %						
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Al
6061	0.64	0.40	0.27	0.08	1.07	0.21	Bal.
5083	0.11	0.32	0.03	0.51	4.40	0.07	Bal.

表 2 电弧焊工艺参数

Table 2 Parameters of arc welding

Parameter	Torch angle / (°)	Tungsten height / mm	Shielding gas flow / (L·min ⁻¹)	Welding speed / (mm·min ⁻¹)	Arc current / A
Value	45	2.0	15	800	70-120

表 3 激光诱导电弧焊工艺参数

Table 3 Parameters of laser-induced arc welding

Parameter	Arc current / A	Torch angle / (°)	Tungsten height / mm	Shielding gas flow / (L·min ⁻¹)	Welding speed / (mm·min ⁻¹)	Laser-arc distance / mm	Laser power / W
Value	100	45	2.0	15	1400	2.0	400-500

3 试验结果

3.1 焊接接头成形及接头截面形貌

图 3 为典型的异种薄板铝合金电弧焊和激光诱导电弧焊的焊接接头形貌,可以看出:焊接接头正面平整光滑,无明显的飞溅现象,有明显的鱼鳞纹;电弧焊的鱼鳞纹为半圆形,而激光诱导电弧焊的鱼鳞

纹为窄长的三角形,这主要与两种焊接方式的焊接速度有关。从焊接接头的背面和截面形貌可以看出,在焊接接头的背面 5083 侧铝合金的塌陷深度和塌陷宽度均比 6061 侧大,此种情况被称为焊接接头不一致塌陷。用 W_{T5} 、 W_{T6} 、 D_{T5} 、 D_{T6} 代表电弧焊 5083 侧和 6061 侧的塌陷宽度和塌陷深度,用 W_{L5} 、 W_{L6} 、 D_{L5} 、 D_{L6} 代表激光诱导电弧焊 5083 和 6061 侧

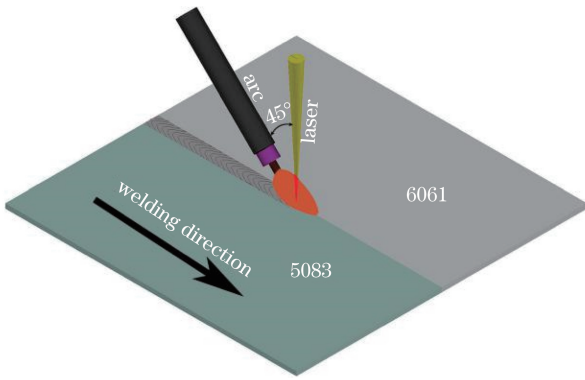


图 1 激光诱导电弧焊示意图

Fig. 1 Diagram of laser-induced arc welding

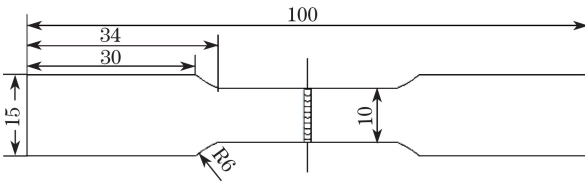


图 2 拉伸试样示意图

Fig. 2 Diagram of tensile specimen

的塌陷宽度和塌陷深度。定义 $R_{TW} = W_{T5}/W_{T6}$, $R_{TD} = D_{T5}/D_{T6}$, $R_{LW} = W_{L5}/W_{L6}$, $R_{LD} = D_{L5}/D_{L6}$, 以

不一致塌陷宽度比 R_{TW} 和 不一致塌陷深度比 R_{TD} 表征电弧焊缝的不一致塌陷的程度, 以不一致塌陷宽度比 R_{LW} 和 不一致塌陷深度比 R_{LD} 表征激光诱导电弧焊缝的不一致塌陷程度。

3.2 焊接参数对焊接接头成形的影响

图 4 为焊接参数对接头不一致塌陷的影响。其中图 4(a) 为电弧焊接过程中各焊接参数下的焊缝截面形貌, 可以看出, 随着焊接电流增大, 气孔等缺陷逐渐减少, 但焊缝塌陷越来越严重。图 4(b) 为电弧焊接过程中焊接电流对 W_{T5} 、 W_{T6} 和 R_{TW} 的影响, 可以看出, 随着焊接电流由 70 A 增大到 120 A, W_{T5} 由 2.23 mm 增大到 4.92 mm, W_{T6} 由 1.30 mm 增大到 2.34 mm, 但不一致塌陷宽度比 R_{TW} 却保持在 2.0 上下波动。图 4(c) 为电弧焊接过程中焊接电流对 D_{T5} 、 D_{T6} 和 R_{TD} 的影响, 可以看出, 随着焊接电流由 70 A 增大到 120 A, D_{T5} 由 0.59 mm 增大到 0.87 mm, D_{T6} 由 0.16 mm 增大到 0.25 mm, 但不一致塌陷深度比 R_{TD} 却保持在 3.6 上下波动。综合图 4(b) 和图 4(c) 可以看出, 在电弧焊接过程中, 在相同的焊接电流下, W_{T5} 、 D_{T5} 分别大于 W_{T6} 、 D_{T6} , 焊缝出现不一致塌陷现象。

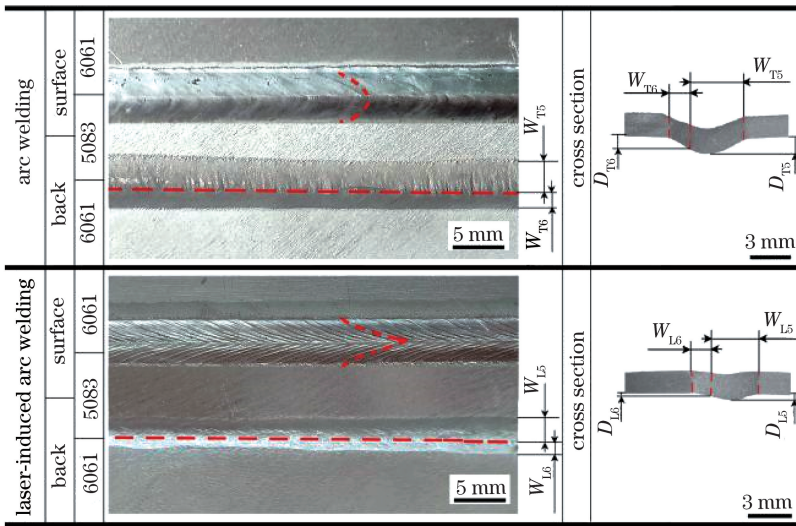


图 3 焊接接头形貌

Fig. 3 Morphology of weld joint

图 4(d) 为激光诱导电弧焊接过程中各焊接参数下的焊缝截面形貌, 可以看出, 随着激光功率增大, 焊缝的整体塌陷量有一定的增加, 焊缝不一致塌陷现象稍有改善。图 4(e) 为激光诱导电弧焊接过程中, 激光功率对 W_{L5} 、 W_{L6} 和 R_{LW} 的影响, 可以看出, 随着激光功率由 410 W 增大到 465 W, W_{L5} 、 W_{L6} 和 R_{LW} 分别保持在 2.4 mm、1.57 mm 和 1.52 上下波动, 这主要是因为激光诱导电弧焊接过程中, 激

光功率较小, 电弧电流是影响塌陷宽度的主要因素。图 4(f) 为激光诱导电弧焊接过程中激光功率对 D_{L5} 、 D_{L6} 和 R_{LD} 的影响, 可以看出随着激光功率由 410 W 增大到 465 W, D_{L5} 由 0.31 mm 增加到 0.44 mm, D_{L6} 由 0.11 mm 增加到 0.2 mm, 而 R_{LD} 则由 3.19 逐渐减小至 2.1。对比图 4(e) 和图 4(f) 可以看出, 各焊接参数下, W_{L5} 、 D_{L5} 分别大于 W_{L6} 、 D_{L6} , 焊缝也出现不一致塌陷现象。

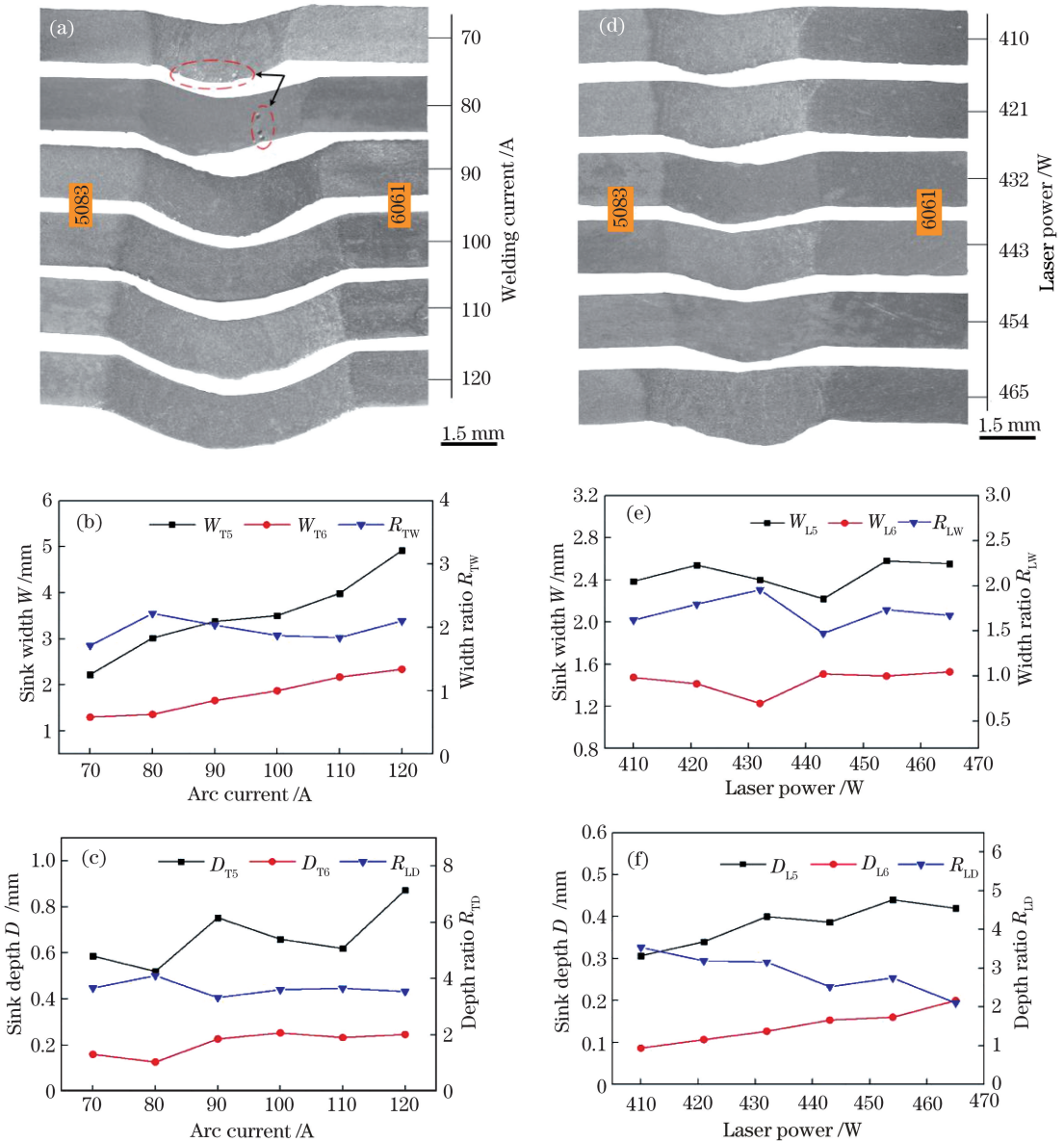


图 4 焊接参数对焊接接头不一致塌陷的影响。(a)电弧焊接接头的截面形貌;(b)电弧焊接电流对焊缝不一致塌陷宽度的影响;(c)电弧焊接电流对焊缝不一致塌陷深度的影响;(d)激光诱导电弧焊接接头的截面形貌;(e)激光诱导电弧焊激光功率对焊缝不一致塌陷宽度的影响;(f)激光诱导电弧焊激光功率对焊缝不一致塌陷深度的影响

Fig. 4 Influences of welding parameters on inconsistent collapse of weld joint. (a) Joint section morphology of arc welding; (b) influence of welding current on inconsistent collapse width in arc welding; (c) influence of welding current on inconsistent collapse depth in arc welding; (d) joint section morphology of laser-induced arc welding; (e) influence of laser power on inconsistent collapse width in laser-induced arc welding; (f) influence of laser power on inconsistent collapse depth in laser-induced arc welding

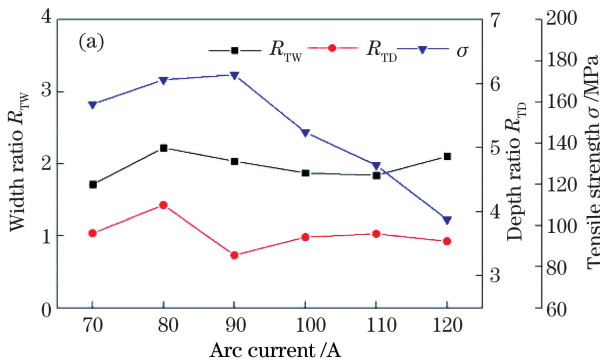
综合图 4 可知:激光诱导电弧焊接过程中 W_{L5} 保持在 2.4 mm 上下波动,电弧焊接过程中 W_{T5} 由 2.23 mm 增大至 4.92 mm, W_{L5} 与 W_{T5} 的最小值相当,但比 W_{T5} 的最大值减小了 51.2%;激光诱导电弧焊接过程中 W_{L6} 保持在 1.57 mm 上下波动,电弧焊接过程中 W_{T6} 由 1.30 mm 增大至 2.34 mm, W_{L6} 比 W_{T6} 的最小值略大,但比 W_{T6} 的最大值减小了

32.9%;激光诱导电弧焊过程中 D_{L5} 由 0.31 mm 增大至 0.44 mm,电弧焊接过程中 D_{T5} 由 0.59 mm 增大至 0.87 mm, D_{L5} 的最大值比 D_{T5} 的最小值减小了 25.4%;激光诱导电弧焊接过程中 D_{L6} 由 0.11 mm 增大至 0.2 mm,电弧焊过程中 D_{T6} 由 0.16 mm 增大至 0.25 mm, D_{L6} 的最小值比 D_{T6} 的最小值减小了 31.3%, D_{L6} 的最大值比 D_{T6} 的最大值减小了 20%。

可见,激光诱导电弧焊接过程中,激光的引入对减小塌陷有明显作用。电弧焊接过程中 R_{TW} 和 R_{TD} 分别保持在 2.0 和 3.6 上下波动,激光诱导电弧焊接过程中 R_{LW} 保持在 1.52 上下波动, R_{LD} 却随着激光功率的增加由 3.19 降至 2.1, R_{LW} 比 R_{TW} 减小了 24%, R_{LD} 的最大值比 R_{TD} 减小了 11.4%。可见,激光诱导电弧焊可以有效改善焊接接头的不一致塌陷现象,同时激光功率的增加对焊缝不一致塌陷的改善也有着显著作用。

3.3 接头塌陷对接头力学性能的影响

图 5(a)为电弧焊接过程中焊接电流对焊接接



头抗拉强度 σ 的影响,可以看出,随着焊接电流增大,焊接接头不一致塌陷程度 R_{TW} 和 R_{TD} 分别保持在 2.0 和 3.6 上下波动,焊接接头抗拉强度先逐渐增加后逐渐减下,当焊接电流为 90 A 时,抗拉强度达到最大值,为母材抗拉强度的 72%。图 5(b)为激光诱导电弧焊接过程中激光功率对焊接接头抗拉强度的影响,可以看出,随着激光功率增大,不一致塌陷宽度比 R_{LW} 保持在 1.52 上下波动,而一致塌陷深度比 R_{LD} 由 3.19 逐渐减小至 2.1,接头的抗拉强度先增后减,当激光功率为 445 W 时, R_{LD} 为 2.52,此时接头的强度达到最大值,约为母材的 80%。

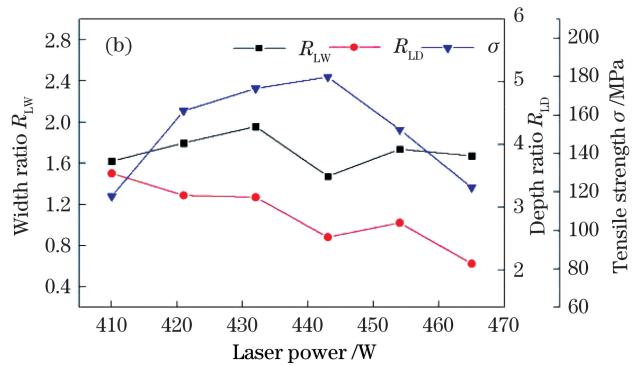


图 5 焊接接头不一致塌陷对接头力学性能的影响。(a)电弧焊接接头不一致塌陷对接头力学性能的影响;(b)激光诱导电弧焊接接头不一致塌陷对接头力学性能的影响

Fig. 5 Influence of joint inconsistent collapse on mechanical properties of joints. (a) Influence of inconsistent collapse on mechanical properties of joint in arc welding; (b) influence of inconsistent collapse on mechanical properties of joint in laser-induced arc welding

4 分析与讨论

4.1 焊缝塌陷成因及改善机制

在薄板铝合金不填丝熔化焊过程中,液态熔池受电弧力、重力和液态金属表面张力的综合作用,这三个力的合力必有一个向下的分量,液态熔池在这个分量的作用下向下运动,结果表现为焊缝出现塌陷现象。焊接接头的不一致塌陷现象主要是由两种铝合金的热物理参数和化学成分不同引起的。表 4 列出了两种铝合金的热物理参数,可以看出,各温度下两种铝合金的比热容相当,而 5083 铝合金的热导率明显小于 6061 铝合金,说明两种铝合金的吸热能力相当,但 5083 铝合金的散热能力弱,因此焊接过程中热量在 5083 铝合金侧累积,使 5083 铝合金侧熔池存在时间较长。牛振^[16]的研究表明,在 5083 铝合金的焊接过程中,Mg 元素蒸发剧烈,以及熔池液态金属流动性强,导致焊缝的塌陷较为严重。由表 1 可以看出,5083 铝合金中 Mg 元素的质量分数为 6061 铝合金中的 4 倍,在焊接过程中 Mg 元素蒸发剧烈,产生的蒸发粒子流反冲力大。5083 铝合金

侧熔池存在的时间长,在重力、电弧力和蒸发粒子流反冲力的共同作用下,塌陷程度较大,焊缝出现不一致塌陷现象。

激光诱导电弧焊对接头塌陷量的改善是因为焊接速度的提高使焊接过程中热输入降低。激光诱导电弧焊接是一个激光-材料-电弧等离子体三者之间相互作用的过程,激光、电弧等离子体和金属蒸气相互作用的过程中发生能级跃迁,释放出大量的能量,提高了热源的能量密度。能量密度的提高使焊接过程中需要提高焊接速度,以保证良好的焊道成形,防止焊缝烧穿。电弧焊和激光诱导电弧焊两种焊接方法下的焊接热输入 H 的计算公式为^[19]

$$H = \frac{1}{v}(\eta_L E_L + \eta_T U_T I_T), \quad (1)$$

式中: v 为焊接速度; η_L 为激光热源的热效率, $\eta_L = 0.5$; η_T 为电弧热源的热效率, $\eta_T = 0.8$; E_L 为激光的输出功率; U_T 为电弧焊的电弧电压; I_T 为电弧焊的电弧电流。

根据(1)式可以计算出电弧焊的最低热输入为 48 J/mm,而激光诱导电弧焊的最高热输入为

44.25 J/mm。可以看出,激光诱导电弧焊接过程中的热输入较小,熔池的体积较小,熔池存在的时间较短,因此电弧力、重力和表面张力向下分量的作用效果减弱,焊缝的塌陷量减小。

表4 铝合金的热物理参数

Table 4 Thermophysical parameters of aluminum alloy

Material	Temperature / ℃	Thermal conductivity / [J·(kg·℃) ⁻¹]	Thermal conductivity / [W·(m·℃) ⁻¹]	
5083	20	900	119	
	100	921	121	
	200	1005	126	
	300	1047	130	
	400	1089	138	
	600	1106	141	
	800	1121	145	
	1200	1148	146	
	6061	20	898	176
		120	951	180
220		1003	184	
320		1055	188	
420		1108	192	
520		1195	196	
620		1200	198	
1100		1300	200	

随着激光功率增加,焊缝不一致塌陷程度减小,是因为激光功率的增大增强了“匙孔”对熔池的搅拌作用,降低了化学成分对接头不一致塌陷的影响。在激光诱导电弧复合焊接过程中,熔池中会出现周期性变化的“匙孔”,其对熔池具有一定的搅拌作用,可以减小接头中化学成分的不均匀性。随着激光功率增大,“匙孔”在最大深度时的保持时间延长,对熔池的搅拌作用增强,焊接接头中的化学成分趋于均匀,从而降低了两种铝合金因化学成分不同而造成的焊缝的不一致塌陷。但是由于两种材料的热物理性能不同,故仍具有一定的焊缝不一致现象。

4.2 接头力学性能的变化

电弧焊焊接接头抗拉强度的上升主要是由焊缝中的气孔减少[图4(a)]引起的,而激光诱导电弧焊焊接接头抗拉强度的上升主要是由不一致塌陷改善引起的接头受力变化造成的。

图6为不一致塌陷接头拉伸试验的受力分析,其中 F 为拉伸试验时加载在试样上的力, F_{N1} 和 F_{N2} 为 F 沿接头方向的分量, $F_{\tau1}$ 和 $F_{\tau2}$ 为 F 垂直于接头方向的分量, α 为 $F_{\tau1}$ 与 F 的夹角, β 为 $F_{\tau2}$ 与 F 的夹角。令 $\alpha + \beta = \theta$, $\alpha > \beta$, 则 $F_{\tau1} = F \cos \alpha$,

$F_{\tau2} = F \cos \beta$ 。塑性材料在静拉伸时,主要在剪应力的作用下发生断裂。拉伸试件的破坏取决于 $F_{\tau1}$ 和 $F_{\tau2}$ 的合力 F_{τ} , 根据三角形余弦定理得

$$F_{\tau}^2 = (F \cos \alpha)^2 + (F \cos \beta)^2 + 2 \cos \alpha \cos \beta \cos(\alpha + \beta) =$$

$$F^2 (\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + 2 \cos \alpha \cos \beta \cos \theta), \quad (2)$$

令 $f(\alpha, \beta) = \cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + 2 \cos \alpha \cos \beta \cos \theta$, 则(2)式可变为

$$F_{\tau}^2 = F^2 f(\alpha, \beta), \quad (3)$$

将 $f(\alpha, \beta)$ 分别对 α 和 β 求偏导, 可得

$$\frac{\partial f}{\partial \alpha} = -\sin(2\alpha) + \sin(2\beta) + 2 \cos \theta \sin(\beta - \alpha), \quad (4)$$

$$\frac{\partial f}{\partial \beta} = -\sin(2\beta) + \sin(2\alpha) + 2 \cos \theta \sin(\alpha - \beta). \quad (5)$$

已知 $0 < \beta < \alpha < 90^\circ$, $90^\circ < \theta < 180^\circ$, 且 θ 接近于 180° , 所以

$$\frac{\partial f}{\partial \alpha} > 0, \quad \frac{\partial f}{\partial \beta} < 0. \quad (6)$$

由(6)式可知, $f(\alpha, \beta)$ 是关于 α 的增函数, 关于 β 的减函数。已知随着激光功率增加, 焊缝的不一致塌陷深度比减小, 即 α 减小且 β 增大, 因此 $f(\alpha, \beta)$ 减小。由(2)式知接头处所受剪应力的合力 F_{τ} 减小, 故接头的抗拉能力随激光功率的增大而增强。

电弧焊和激光诱导电弧焊接接头抗拉强度的下降都是由塌陷程度过大而引起的受力变化造成的。

对于电弧焊, 随着焊接电流增大, 焊缝不一致塌陷程度不变, 即 α/β 为一定值, 但焊缝塌陷深度变大, 即 θ 变小, 令 $\alpha = \lambda\theta$, $\beta = \rho\theta$, 其中 λ 和 ρ 为区间 $(0, 1)$ 上的两个系数, 因为 $\alpha > \beta$, 故 $\lambda > \rho$ 。此时(2)式可变为

$$F_{\tau}^2 = F^2 [\cos^2(\lambda\theta) + \cos^2(\rho\theta) + 2 \cos(\lambda\theta) \cos(\rho\theta) \cos \theta], \quad (7)$$

令 $g(\theta) = \cos^2(\lambda\theta) + \cos^2(\rho\theta) + 2 \cos(\lambda\theta) \cos(\rho\theta) \cos \theta$, 则(7)式可变为

$$F_{\tau}^2 = F^2 g(\theta), \quad (8)$$

对 θ 求导可得

$$\begin{aligned} \frac{dg}{d\theta} = & -\lambda \sin \alpha - \rho \sin \beta - 2(\lambda \sin \alpha \cos \beta \cos \theta + \\ & \rho \cos \alpha \sin \beta \cos \theta + \cos \alpha \cos \beta \sin \theta) < \\ & -\rho [\sin(2\alpha) + \sin(2\beta) + \sin(2\theta) + \\ & 2 \cos \alpha \cos \beta \sin \theta], \end{aligned} \quad (9)$$

由于 $2\alpha > \theta > 2\beta$, 故

$$\frac{dg}{d\theta} < 0. \quad (10)$$

由(10)式可知, $g(\theta)$ 是关于 θ 的减函数。随着焊接电流增大, θ 减小, $g(\theta)$ 增大, F_{τ} 也增大, 接头的抗拉强度随焊接电流增大而降低。

对于激光诱导电弧焊, 当激光功率较大时, 焊缝不一致塌陷程度较小。当 $\alpha = \beta \approx \theta/2$ 时, (2)式可变为

$$F_{\tau} = F(\cos \theta + 1). \quad (11)$$

由(11)式可知, F_{τ} 随 θ 的减小而增大, 接头的抗拉强度随激光功率的增强而降低。

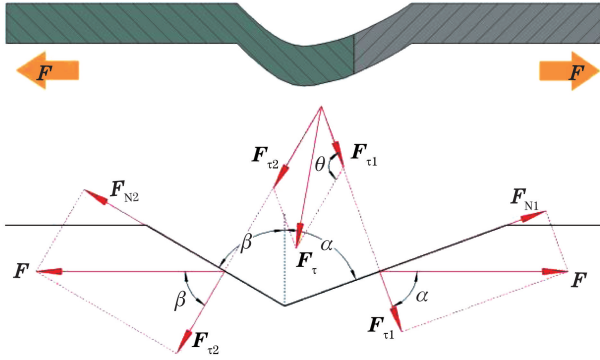


图 6 焊接接头的受力分析

Fig. 6 Stress analysis of welding joints

5 结 论

等厚异种薄板铝合金拼焊过程中, 材料热物理性能和化学成分的差异, 导致焊缝两侧受力不均匀, 造成焊缝的不一致塌陷。在激光诱导电弧焊接过程中, 激光的引入使焊接热输入明显降低, 激光诱导电弧焊的最大热输入比电弧焊的最小热输入减小了 7.81%, 导致焊缝塌陷量明显减小, 其中 D_{L5} 的最大值比 D_{T5} 的最小值减小了 25.4%。此外, 激光的引入对熔池具有一定的搅拌作用, 改善了焊缝的不一致塌陷。在电弧焊接过程中, R_{TW} 和 R_{TD} 分别保持在 2.0 和 3.6 上下波动, 而在激光诱导电弧焊过程中, R_{LW} 保持在 1.52 上下波动, R_{LD} 却随着激光功率的增加由 3.19 降至 2.1, R_{LW} 比 R_{TW} 减小了 24%, R_{LD} 的最大值比 R_{TD} 减小了 11.4%。随着激光功率增大, 接头不一致塌陷程度减小, 改善了接头的受力情况, 使接头的抗拉能力变强。当激光功率为 445 W 时, R_{LW} 为 1.52, R_{DW} 为 2.52, 接头抗拉强度达到最大, 约为 5083 母材的 80%。随着激光功率的进一步增大, 焊缝的整体塌陷深度变大, 塌陷深度的影响强于不一致塌陷改善带来的影响, 接头抗拉能力又逐渐降低。

参 考 文 献

- [1] Mei L F, Chen G Y, Jin X Z, *et al.* Study on fiber laser overlap-welding of automobile aluminum alloy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(8): 2091-2097.
梅丽芳, 陈根余, 金湘中, 等. 车用铝合金光纤激光搭接焊的研究 [J]. 中国激光, 2010, 37(8): 2091-2097.
- [2] Li Y H, Lin J P. Status-quo and trends of researches on tailor welded blanks for vehicle body [J]. Automotive Engineering, 2014, 36(6): 763-767, 772.
李艳华, 林建平. 汽车车身激光拼焊板国内外研究进展 [J]. 汽车工程, 2014, 36(6): 763-767, 772.
- [3] Wang H Y, Sun J, Liu L M. Formation and controlling mechanism of pores in laser-TIG hybrid welding of 6061-T6 aluminum alloys at high speed [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(3): 0302001.
王红阳, 孙佳, 刘黎明. 6061-T6 铝合金激光-电弧复合高速焊气孔形成及控制机制 [J]. 中国激光, 2018, 45(3): 0302001.
- [4] Schwinn J, Besel M. Determination of residual stresses in tailored welded blanks with thickness transition for crack assessment [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2019, 208: 209-220.
- [5] Kumar Dama K, Suresh Babu V, Rao R N. State of the art on automotive lightweight body-in-white design [J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(10): 20966-20971.
- [6] Tisza M, Czinege I. Comparative study of the application of steels and aluminium in lightweight production of automotive parts [J]. International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, 2018, 1(4): 229-238.
- [7] Habibi M, Hashemi R, Fallah Tafti M, *et al.* Experimental investigation of mechanical properties, formability and forming limit diagrams for tailor-welded blanks produced by friction stir welding [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 31: 310-323.
- [8] Sun G Y, Tan D D, Lü X, *et al.* Multi-objective topology optimization of a vehicle door using multiple material tailor-welded blank (TWB) technology [J]. Advances in Engineering Software, 2018, 124: 1-9.
- [9] Chen S S, Lin J P. An analytical model to predict the effect of weld location on tensile behaviors of tailor welded blanks [J]. Journal of Materials Engineering, 2011, 39(10): 33-37.
陈水生, 林建平. 焊缝位置对拼焊板拉伸行为影响的解析预测 [J]. 材料工程, 2011, 39(10): 33-37.

- [10] Bayley C J, Pilkey A K. Influence of welding defects on the localization behaviour of an aluminum alloy tailor-welded blank [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2005, 403(1/2): 1-10.
- [11] Huang Y, Huang J, Nie P L. Microstructures and textures of 6016 and 5182 aluminum laser welded joints[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(4): 0402003.
黄毅, 黄坚, 聂璞林. 6016 和 5182 铝合金激光焊接接头的组织与织构[J]. *中国激光*, 2019, 46(4): 0402003.
- [12] Zhang D W. A study of aluminum alloy laser welding process[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012.
张大文. 铝合金激光焊接工艺研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2012.
- [13] Yang J. Study on the process behavior and defects control during laser deep penetration welding of aluminium alloy[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2011.
杨璟. 铝合金激光深熔焊接过程行为与缺陷控制研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2011.
- [14] Ancona A, Sibillano T, Tricarico L, *et al.* Comparison of two different nozzles for laser beam welding of AA5083 aluminium alloy[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 164/165: 971-977.
- [15] Ancona A, Lugarà P M, Sorgente D, *et al.* Mechanical characterization of CO₂ laser beam butt welds of AA5083[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 191(1/2/3): 381-384.
- [16] Kim D, Lee W, Kim J, *et al.* Macro-performance evaluation of friction stir welded automotive tailor-welded blank sheets: part II-Formability [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2010, 47(7/8): 1063-1081.
- [17] Zhang J, Lin S J, Su S X, *et al.* Effect of defocusing amount on weld shaping in fiber laser welding of aluminum alloy [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(12): 121405.
张健, 林仕君, 苏绍兴, 等. 光纤激光焊接铝合金离焦量对焊缝成形的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(12): 121405.
- [18] Niu Z. Study on forming quality of marine 5083 aluminum alloy CO₂ laser welding weld[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2008.
牛振. 船用 5083 铝合金 CO₂ 激光焊接焊缝成形质量研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2008.
- [19] Kou S. *Welding metallurgy* [M]. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2002.