

铝合金激光—小功率脉冲 MIG 电弧
复合热源焊接特性分析

王 威， 王旭友， 秦国梁， 雷 震*
(机械科学研究院 哈尔滨焊接研究所, 哈尔滨 150080)

摘 要: 针对 5A06 铝合金, 通过一系列对比数据综合分析了 MIG 焊和激光-MIG 复合热源焊接技术在焊缝熔深、焊缝成形、焊接速度、焊接热输入等方面的优缺点。结果表明, 在 MIG 平均电流小于 200 A 的小功率脉冲 MIG 电弧区域内, 等热输入且等焊接速度条件下, 激光—MIG 复合热源焊接技术与 MIG 相比可以提高焊缝深宽比 1~2 倍, 增加焊缝熔深 0.43~2.5 倍; 等热输入且等平均焊接电流条件下, 与 MIG 相比, 激光-MIG 复合热源焊接技术可以提高焊接速度 0.6~1.5 倍, 增加焊缝熔深 0.5~5.9 倍; 激光-MIG 复合热源焊接技术可以用高于 MIG 焊 0.6~6.5 倍的焊接速度和更小的焊接热输入获得与 MIG 同样的焊缝熔深; 与 MIG 焊相比, 激光-MIG 复合热源焊缝的铺展性更好, 更适合于高速焊接; MIG 复合 2 kW 的激光能量后会增加平均电弧电压、减小平均电流。

关键词: 复合热源焊接; 激光焊接; MIG 焊接; 铝合金焊接

中图分类号: TG456.9 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2007)08-037-05



王 威

0 序 言

铝合金由于具有重量轻、密度低、耐腐蚀、高温性能好等特点, 已经广泛应用于航空航天、车辆制造、船舶制造等工业领域。目前, 在现代的焊接技术中, 常规电弧焊接技术仍然占统治地位。这主要是因为弧焊的方法具有设备投资小、生产成本低、焊接适应性强特点, 另外通过填丝还可以调节焊缝的成分与组织, 从而达到提高接头性能的目的。但是, 传统的弧焊方法也具有自身的缺陷, 例如焊缝熔深浅、焊接效率低、难于实现高速焊接、焊接变形大焊后校形困难、热影响区大、接头性能差等。激光—MIG 复合热源焊接技术是近几年国内外研究比较热门的一种焊接方法, 主要由于该方法具有增加焊缝熔深、提高焊接速度、减小焊缝变形量等优点。文中通过一系列的对比数据来综合分析 MIG 和激光—MIG 复合热源焊接技术的优缺点, 揭示激光—MIG 复合热源焊接铝合金的优势所在, 为铝合金焊接提供一种有优势的焊接方法。

1 试验材料与方法

试验材料采用 8 mm 厚的 5A06(LF6)铝镁合金, 板材尺寸为 300 mm×50 mm, 铝合金焊丝材料为 5356, 焊丝直径 $\phi 1.2$ mm, 焊丝伸出长度 18 mm, 保护气体采用了纯氩保护, 气体流量 20 L/min, 焊接方向为激光在电弧前, 激光和焊丝之间的夹角为 30°。激光器为 2 kW 连续输出的固体(Nd:YAG)激光器, 焦距 200 mm, 最小光斑直径为 0.6 mm, MIG 焊机为全数字化直流脉冲 MIG 焊接电源, 文中提到的小功率脉冲 MIG 电弧是指平均电流不大于 200 A 的区域。试验用焊接工艺参数如表 1 所示。

表 1 焊接工艺参数
Table 1 Welding parameters

平均电流 I/A	激光功率 P/W	焊接速度 v/(m·min ⁻¹)	激光离 焦量 ΔZ/mm	光—丝间距 d/mm
70~200	2 000	0.2~3	-1	1

2 试验结果分析

2.1 MIG 与 Hybrid 焊缝熔深对比

图 1 为平均电流 120 A 时, 速度变化对单独

收稿日期: 2007-05-18
基金项目: 国家科技部支撑项目(2006BAF04B10); 黑龙江省自然科学基金项目(ZJG0601)
*参加此工作的还有林尚扬, 杜 兵

MIG 和激光—MIG 复合热源(以下简称 Hybrid 或 Laser+MIG)焊缝熔深的影响, 激光—MIG 复合热源焊接过程中加入的激光功率为 2 kW。从图 1 中可以看出随着焊接速度增加, Hybrid 焊缝熔深基本均匀递减, 与激光焊缝熔深的特点相类似, 而 MIG 焊缝熔深, 随着速度增加, 在 0.6 m/min 时达到最大值, 而后均匀递减。总体来看 Hybrid 焊缝熔深要明显大于 MIG 焊缝熔深, 与 MIG 相比, Hybrid 基本上增加熔深 1 倍以上, 最大增加近 4 倍。

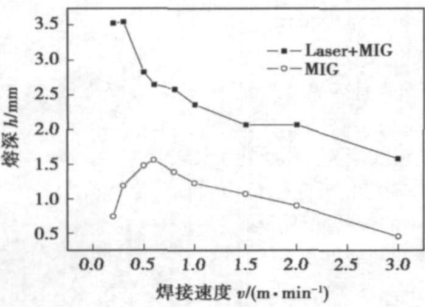


图 1 平均焊接电流为 120 A 时焊接速度对焊缝熔深的影响

Fig. 1 Effects of welding speed on weld penetration

图 2 为不同速度下二者焊缝熔深/熔宽(以下简称深宽比)的变化趋势, 焊缝的深宽比越大, 同样焊缝熔深下焊缝和热影响区的宽度也越小, 这对减小焊缝变形量和由焊接热输入引起的母材性能降低是非常有利的。从图中可看出 Hybrid 焊缝的深宽比要明显大于 MIG 焊缝, 并且当速度大于 0.8 m/min 时, 这一趋势更加明显。

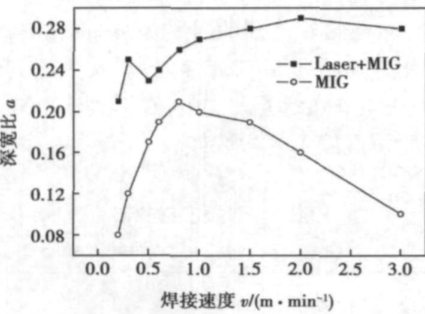


图 2 平均电流为 120 A 时, 焊接速度对焊缝深宽比的影响

2.2 等热输入条件下 MIG 与 Hybrid 焊缝的对比
热输入综合了焊接热输入和焊接速度等焊接工艺参数对焊接热循环的影响。热输入增大时, 焊缝变形量增加, 热影响区的宽度增大, 对焊缝的性能有

很大影响。图 3 为 MIG 和 Hybrid 焊在热输入相等、平均焊接电流相等的条件下的对比图, 主要对比两种焊接方法的焊接速度的和焊缝熔深。从图 3 中可看出, 当两种焊接方法的参数同为平均电流 78 A、焊接热输入 4.1 kJ/cm 时, MIG 的焊接速度为 0.2 m/min 焊缝熔深为 0.29 mm, 而 Hybrid 的焊接速度可达 0.5 m/min 焊缝熔深为 2.01 mm, 与 MIG 相比分别提高了 1.5 倍和 5.9 倍。这现象在平均电流分别为 113, 117, 200 A 时还会复现, 可见当平均焊接电流不大于 200 A 时这是普遍规律, 从图中还能看出, 随着平均电流增加, Hybrid 增加焊接速度、增加焊缝熔深的能力逐渐减弱。

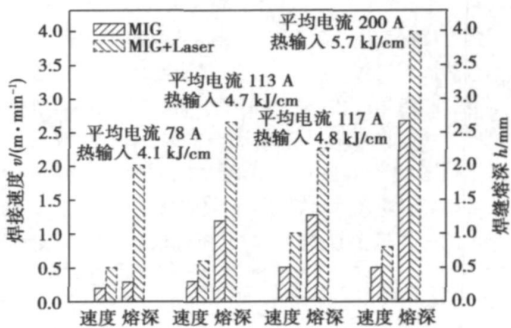


图 3 等热输入、等电流条件下 MIG 和 Hybrid 焊缝对比
Fig. 3 Contrast between MIG welding and hybrid welding on condition of equal welding heat input and equal welding current

图 4 为相同焊接速度、相同热输入条件下, MIG 和 Hybrid 焊缝熔深和深宽比的对比图。先看图中最左边的一组对比数据, 平均焊接速度 0.4 m/min, 热输入 5.3 kJ/cm 时, MIG 的焊缝熔深为 1.44 mm, 而 Hybrid 的焊缝熔深可达 2.75 mm, 增加了近 1 倍, 焊

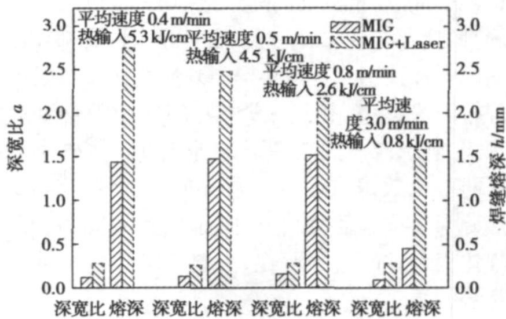


图 4 等热输入、等速度条件下 MIG 和 Hybrid 焊缝对比
Fig. 4 Contrast between MIG welding and hybrid welding on condition of equal welding heat input and equal welding speed

缝的深宽比则从 MIG 的 0.12 mm 变化到 Hybrid 的 0.28 mm, 增加了 1 倍多。Hybrid 增加熔深的特点在高速焊接时体现的更为明显, 见图 3 中焊接速度 3 m/min, 热输入 0.8 kJ/cm 这一组数据, 与 MIG 相比, Hybrid 可以增加焊缝熔深 2.5 倍、深宽比 2.1 倍。

2.3 焊缝熔深相等条件下 MIG 焊缝与 Hybrid 焊缝的对比

图 5 对比了获得相同焊缝熔深条件下, 两种焊接方法所需要的热输入和焊接速度。通过对比可以看出, Hybrid 可以用高于 MIG 焊 0.6~6.5 倍的速度获得与 MIG 相同焊缝熔深, 焊接速度提高, 就意味着焊接效率 and 生产率提高。对比两种焊接方法的焊接热输入, 为了获得相同焊缝熔深 2.6, 1.9, 2.0, 1.4 mm, Hybrid 所需要的热输入分别为 MIG 热输入的 57%, 49%, 41%, 20%, 既 Hybrid 单位长度上的热输入相对比较小, 意味着相同焊缝熔深条件下, Hybrid 焊缝变形量比较小, 焊缝热影响区更窄。

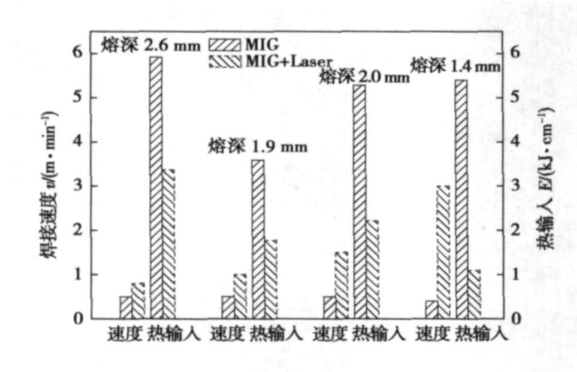


图 5 等熔深条件下 MIG 和 Hybrid 焊缝对比

Fig. 5 Contrast between MIG welding and hybrid welding in equal weld penetration

2.4 MIG 焊缝与 Hybrid 焊缝的铺展性

焊缝余高和焊缝熔宽比(简称高宽比或余高/熔宽)可以用来表示焊缝的表面铺展性和作为评价焊缝的表面成形的重要参数之一, 焊缝的高宽比越小, 说明焊缝的铺展性越好。图 6 表示了焊接速度为 0.8 m/min 时, 焊缝高宽比随着平均电流的变化趋势。Hybrid(即图中的 MIG+Laser)的焊接参数由同电压、电流的 MIG 参数复合 2 kW 的激光能量得来。

图 6 中可以看出两种焊接方法的焊缝高宽比随着平均电流的增加逐渐降低, MIG 的下降趋势要大于 Hybrid, 但 Hybrid 焊缝高宽比一直小于 MIG 焊缝的高宽比, 这证明 Hybrid 焊缝的铺展性好于 MIG 焊缝。Hybrid 的高宽比基本上保持在 0.15~2.0 之间变化, 这说明随着平均电流增加, Hybrid 焊缝的余高

和熔宽同时也增加, 并且增加的比例基本保持一致。在大于 200 A 的电流区域, 两种焊接方法的高宽比差距变得比较小, 也就是说 2 kW 激光能量对 MIG 焊成形的影响力逐渐下降了。

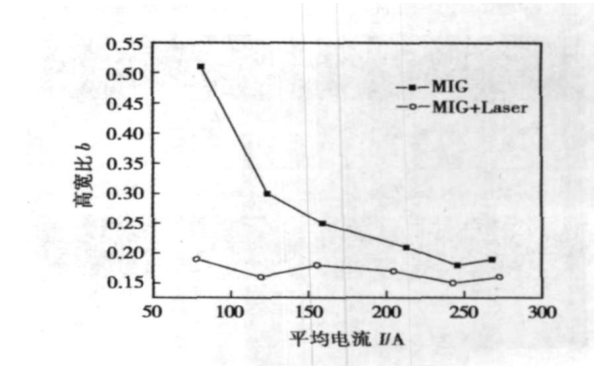


图 6 焊接速度 0.8 m/min 时电流对焊缝高宽比的影响

Fig. 6 Effects of welding current on weld reinforcement-to-width ratio

图 7 表示了平均焊接电流为 120 A 时, 焊缝的高宽比随着焊接速度的变化趋势。可以看出焊接速度对 MIG 焊缝的高宽比影响比较大, 低速和高速条件下相差近 1 倍, 而 Hybrid 焊缝高宽比随着焊接速度增加略有降低, 但受焊接速度影响比较小, 基本集中在 0.15~2.0 之间。在全部试验速度区间 MIG 焊缝的高宽比要明显大于 Hybrid 焊缝的高宽比, 尤其在低速 0.2 m/min 和高速 3.0 m/min 时, 二者高宽比相差 1 倍, 说明 Hybrid 在改善焊缝的铺展性方面有很大优势, 尤其在低速和高速焊接时。图 8 为两种焊缝在不同速度下的焊缝横截面形状, 通过对比可以很直观地看到 Hybrid 焊缝具有熔深大、熔宽大、余高低的特点。

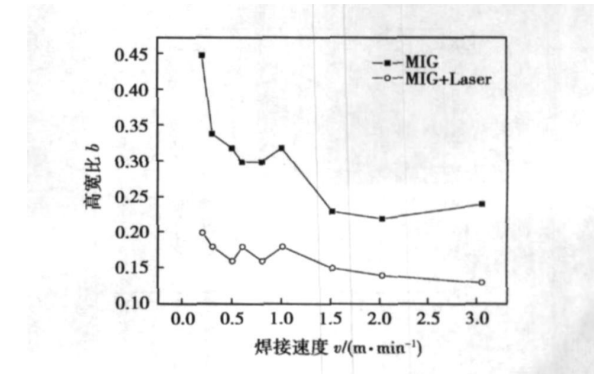


图 7 平均焊接电流 120 A 时焊接速度对焊缝高宽比的影响

Fig. 7 Effects of welding speed on weld reinforcement-to-width ratio

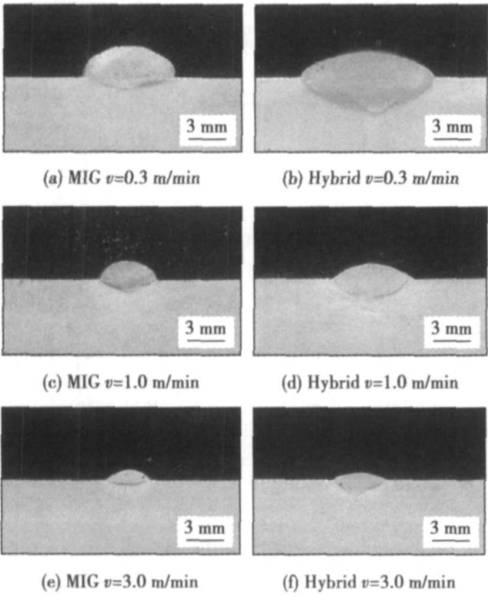


图 8 平均焊接电流为 120 A 时, 不同焊接速度下两种焊缝对比

Fig. 8 Contrast MIG welding and hybrid welding under different welding speed

2.5 2 kW 激光与 MIG 复合前后电参数的变化规律

图 9 为 MIG 焊和同参数 MIG 复合 2 kW 激光的复合热源焊接在不同焊接速度下平均电流的变化规律。从图中可以看出 MIG 焊复合 2 kW 激光能量后, 平均电流普遍下降, 都低于 MIG 焊的电流。图 10 为 MIG 与 2 kW 激光复合前后平均电弧电压随着焊接速度的变化规律, 可以看出 MIG 与 2 kW 激光复合后平均电弧电压要增加。电压增加说明弧长增大, 弧长增加导致电弧的电阻增加, 自然平均电流会下降。从图 9 和图 10 中还可以看出随着焊接速度增加两种焊接方法的平均电流都逐渐增加、平均电弧电压都逐渐下降。

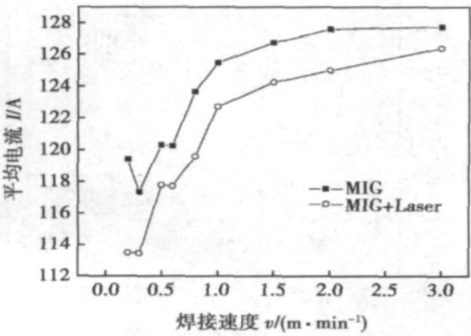


图 9 复合前后平均电流随着焊接速度的变化规律

Fig. 9 Variety of welding current with welding speed at MIG welding and laser—MIG hybrid welding

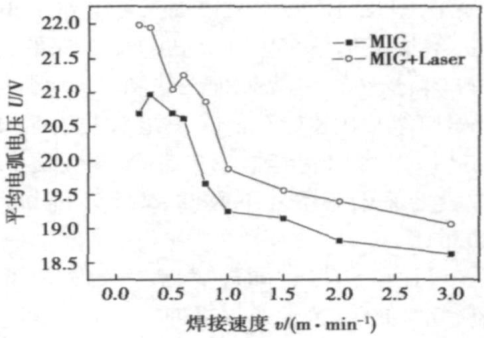


图 10 复合前后平均电压随着焊接速度的变化规律

Fig. 10 Variety of arc voltage with welding speed at MIG welding and laser—MIG hybrid welding

图 11 为焊接速度 0.8 m/min 时, 不同电流下两种焊接方法的电流、电压变化趋势。从图中也可以看出与图 8 和图 9 相类似的规律, 复合 2 kW 的激光能量后会增加平均电弧电压、减小平均电流。

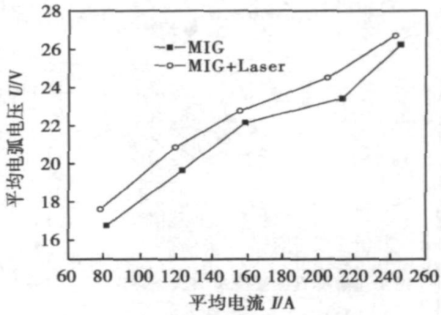


图 11 焊接速度 0.8 m/min 时, 复合 2 kW 激光前后电压电流变化

Fig. 11 Variety of welding current and arc voltage at MIG and laser—MIG hybrid welding

3 结 论

- (1) 当平均电流 120 A 时, 在 MIG 焊基础上复合 2 kW 激光能量可以增加熔深 1~4 倍。
 - (2) 在 MIG 平均电流小于 200 A 的小电流区域内, 热输入相等、平均焊接电流相等条件下, 与 MIG 相比, Hybrid 可以提高焊接速度 0.6~1.5 倍和增加焊缝熔深 0.5~5.9 倍; 相同热输入、相同焊接速度条件下, Hybrid 可以提高焊缝深宽比 1~2 倍, 增加焊缝熔深 0.43~2.5 倍。
 - (3) Hybrid 焊可以用高于 MIG 焊 0.6~6.5 倍的焊接速度和更小的焊接热输入获得与 MIG 同样的焊缝熔深。
- [下转第 61 页]

壁根部进行有效加热,保证侧壁熔合良好,图 12 为所得超窄间隙焊缝截面。

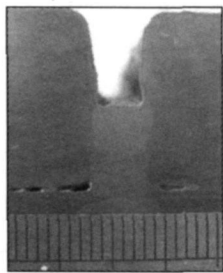


图 12 焊剂带约束电弧超窄间隙焊缝截面
Fig. 12 Cross section of constricting arc ultra-narrow gap weld with flux strips

3 结 论

- (1) 焊剂带靠弧柱区的热量被加热熔化。降低电弧电压,加快送带速度或增加焊剂带作用距离,焊剂带作用长度都将增长。
- (2) 增加焊剂带作用长度,将使电弧的长度增长而宽度变窄,进而使焊缝熔宽减小而熔深增加;减小焊剂带作用距离,将显著减小电弧的宽度,使焊缝

熔宽减小而熔深增加。
(3) 焊剂带约束电弧具有加热集中且电弧受约束程度可调等优点,对解决窄间隙焊接时侧壁根部不易加热的问题具有独特的优势,并可实现超窄间隙焊接。

参考文献:

[1] 安藤弘平,长谷川光雄. 焊接电弧现象[M]. 施雨湘,译. 彭日辉,校. 北京:机械工业出版社,1982
[2] 沈风刚,卢学刚. 高纤维素型焊条立向下焊接工艺性能研究[J]. 焊接技术,1998,10(5):30—31.
[3] 陈剑虹,何正强,樊丁. 焊条电弧力的测定研究[J]. 焊接学报,1987,8(3):107—113.
[4] Zhu Liang, Zheng Shaoxian, Chen Jianhong. Development of ultra-narrow gap welding with constrained arc by flux band[J]. China Welding, 2006, 15(2): 44—49.
[5] 郑韶先,朱亮,陈剑虹. 焊剂带约束电弧焊接方法研究[J]. 焊接,2006(8):40—43.
[6] 吴启东. 钨极焊接电弧在窄间隙中的电场分布[J]. 焊接学报,1983,4(1):39—54.

作者简介:郑韶先,男,1978 年出生,博士研究生。主要从事焊接工艺及电弧物理的研究。发表论文 3 篇。
Email: zhengxian15@lut.cn

[上接第 40 页]

- (4) 与 MIG 焊相比,Hybrid 焊缝的铺展性更好,更适合于高速焊接。
- (5) MIG 复合 2 kW 的激光能量后会增加平均电弧电压、减小平均电流。

参考文献:

[1] Magee K, Merchant V E. Laser-assisted gas metal arc weld characteristics[J]. Laser Materials Processing, 1991, 71(6):382—399.

[2] Ditley U. Prospect by combing and coupling laser beam and arc welding processes[J]. Welding in the World, 2000 (3):37—46.
[3] Haferkamp H, Ostendorf A. Nd: YAG Laser MIG hybrid welding of zinc-coated fine sheet metal and magnesium materials[J]. LaserOpto, 2001, 33(1):61—64.

作者简介:王威,男,1976 年出生,硕士,工程师。主要从事激光焊接和激光—电弧复合热源焊接方面的研究工作。发表论文 10 余篇。
Email: laserww@163.com

tability of $\text{Sn}-9\text{Zn}-\text{X}$ can be obviously improved in N_2 atmospheres. It is also found that $\text{Sn}-9\text{Zn}-\text{X}$ lead-free solders show preferable wettability with $\text{ZnCl}_2-\text{NH}_4\text{Cl}$ flux, even better than that of $\text{Sn}-3.5\text{Ag}-0.5\text{Cu}$ solder under the same condition, which may reveal the feasibility of improving the wettability of $\text{Sn}-\text{Zn}$ series lead-free solders by developing suitable flux.

Key words: lead-free solder; $\text{Sn}-\text{Zn}$ solder; alloy element; wettability

Welding characteristics of laser-low power pulse MIG hybrid welding aluminium alloy WANG Wei, WANG XuYou, QI GuoLiang, LEI Zhen, LIN ShangYang, DU Bing (Harbin Welding Institute, Harbin 150080, China). p37-40, 61

Abstract: The weld penetration, formation of weld, welding speed and weld heat input of MIG (metal inert-gas) welding and laser-MIG hybrid welding are analyzed for welding 5A06 aluminum alloy. It is shown that comparing with MIG welding, laser-MIG hybrid welding will increase depth-to-width ratio 100%-200% and increase weld penetration 43%-250%, as average current is less than 200 A and welding heat input and welding speed are equal. If welding heat input and average welding current are equal, welding speed of laser-MIG hybrid welding is higher 0.6-1.5 times than that of MIG welding, and weld penetration of laser-MIG hybrid welding is deeper 1.5-6.9 times than that of MIG welding. Equal weld penetration of laser-MIG hybrid welding and MIG welding can be obtained if lower welding heat input is applied in the hybrid welding and welding speed of the hybrid welding is 0.6-6.5 times higher than the one of MIG welding. Laser-MIG hybrid welding has good weld spreadability and is fit for high speed welding. It also was found that 2 kW laser power compounding with MIG will increase average arc voltage and decrease average welding current of MIG welding.

Key words: hybrid welding; laser welding; MIG welding; aluminum alloy welding

Numerical simulation of temperature field in deep penetration laser welding under hot and press condition XIONG Zhijun, LI Yongqiang, ZHAO Xihua, LI Min, ZHANG Weihua (School of Materials Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China). p41-44

Abstract: Deep penetration laser welding was performed at aluminum alloy LF3Y2 under hot and press condition. A heat source model, which comprises a gauss plane heat source on the top surface and a revolved gauss body heat source, was presented in this condition. Numerical simulation was adopted by the heat source model and ANSYS software. The results show that sufficient width and penetration of weld could be obtained under high speed welding operation and the isotherms looked like ellipse. The temperature gradient was correspondingly higher in the front of moving heat source than at the end. The cross-section morphology of simulation welded joint was almost in accordance with the results attained by experiments which confirmed the reasonableness of the model.

Key words: deep penetration laser welding; heat source

model; numerical simulation; temperature field

Effect of magnetic field on microstructure and properties of carbon arc surfacing layer LIU Zhengjun, ZHANG Guiqing, YIN Yijun, ZENG Xiebo (School of Material Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110023, China). p45-48

Abstract: In order to refine the structure of deposited metal and control the morphology and distribution of hard phases in surfacing deposited metal, DC transverse magnetic field was applied to the carbon arc surfacing of $\text{Cr}-\text{B}-\text{Ni}-\text{V}$ iron based alloy system. The influence of magnetic intensity on hardness and wearing resistance was obtained through analyzing the hardness, wearing and microstructures of the surfacing deposited metal. The results show that the surfacing deposited metal of introducing magnetic field has higher hardness and better wearing resistance than the surfacing deposited metal without magnetic field; the properties of surfacing deposited metal are optimal when magnetic field current is 3 A, and surfacing current is 180 A, and surfacing speed is 12 cm/min. The hard phase in the surfacing deposited metal is fine and even, hexagonal in shape. Mean while the orientation of them is consistent.

Key words: transverse magnetic field; hardfacing; grinding abrasion; hard phase

Mechanical properties of ring nugget in sheet-to-tube joining

LIANG Caiping, ZHANG Yansong, LAI Xinmin, CHEN Guanlong (School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao tong University, Shanghai 200030, China). p49-53

Abstract: Strength of resistance spot weld is determined by the physical attributes of weldment including material and geometric issues. The strength of the ring nugget in sheet-to-tube single-sided spot welding is different from that of the button nugget in traditional sheet-to-sheet spot welding. And the relationships between strength and attributes of ring nugget are unknown. Meanwhile, the large number of variables and experimental uncertainty also make it difficult to establish this relationships. A numerical simulation experiment was conducted using the concept of design of experiments (DOE) and the method of finite element based on the tensile-shear tests. The mechanical properties during tensile-shear process was analyzed and quantitative relationships were established to link a weld's tensile-shear force and its geometrical attributes, which supplied the proof for the nugget quality estimation.

Key words: single-sided spot welding; numerical simulation; ring nugget; mechanical properties

Extraction of welding pool shape using linear approximation

WANG Jifeng, WANG Wenyi, CHEN Shanben (Institute of Welding Technology, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China). p54-56

Abstract: The welding bead shape is crucial for welding quality. Three-dimensional shape of the welding pool contain much information about quality. Thus, shape from shading technique was