

# 高强度钢差厚板激光拼焊焊缝成形及组织分析

雷玉成, 朱 强, 陈 炜, 程晓农\*  
(江苏大学 材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘 要: 选取 2.0 mm、1.5 mm 厚的 HSA340 板材和 0.7 mm 厚的 H340LAD+Z 板材, 按强度相近厚度不同原则两两搭配进行激光拼焊。焊后选取具有代表性的焊缝横截面进行金相组织检验, 并对焊缝接头各区域进行硬度测量, 分析了激光焊缝接头各区域金相组织及其硬度的变化。结果表明, 差厚板激光拼焊过程中, 母材散热情况不同, 会造成焊缝金相组织在各自靠近母材的局部区域有很大差异; 激光拼焊板的热影响区宽度窄, 与母材及焊缝间有明显的界线, 生成的组织细密; 焊缝及热影响区的硬度值均大于母材; 合理调整激光光束的入射位置和入射角度, 可以显著改善焊缝成形, 提高拼焊板的接头质量。

关键词: 高强度钢; 激光焊接; 拼焊板; 差厚

中图分类号: TG456.7 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2007)08-009-05



雷玉成

## 0 序 言

近年来, 随着国民经济的增长, 汽车开始走进千家万户, 价格低、性能好的汽车越来越受到人们的青睐。轻量化、省燃油、高安全性也成为汽车业发展的三大主要方向。拼焊板技术的应用为减轻车身重量、降低生产成本提供了机遇。拼焊板是指在成形前将两块或两块以上不同厚度、不同材质或不同表面涂层的板材拼焊在一起, 而形成的冲压用平板坯料<sup>1,2</sup>。

拼焊板应用于汽车制造业可以: (1) 减少车身零件的数量; (2) 在材料方面, 可以节省板材的使用大约 25%~40%, 并可以利用废料提高板材的使用率; (3) 满足汽车各部分对材质、厚度以及性能的需求, 将不同性能、涂层和厚度的板料拼焊在一起, 提高了车身设计的灵活性, 缩短了设计和开发的周期; (4) 根据车身不同部位强度的要求, 合理使用一些轻质复合材料, 而不需要焊接加强筋, 从而减轻车身的质量<sup>3</sup>。

随着材料科学的不断发展, 有越来越多的材料投入到拼焊板的生产, 其中以高强度钢用量较多。工程材料中一般将屈服强度  $R_{eL}=210\sim550$  MPa 的钢材定义为高强度钢(HSS)<sup>4</sup>。采用高强度钢作为

拼焊板母材的优点是, 设计师在车身结构设计上可采用更薄的钢板, 并能获得相同的强度, 因此降低了车身重量。另外, 激光拼焊技术专门用于拼焊板的焊接, 与一般的拼焊板焊接方法相比具有焊接效率高、热影响区宽度窄等优点。

## 1 试验材料和方法

试验材料采用宝钢牌号 HSA340 和 H340LAD+Z 两种高强度钢材料, 其化学成分和基本力学性能列于表 1。由表 1 所示, 两种材料的屈服强度在 210~550 MPa 的范围内, 属于高强度钢的范畴。

表 1 材料化学成分(质量分数, %)和基本力学性能  
Table 1 Chemical composition and mechanical properties of material

材料	厚度 $\delta/mm$	化学成分		
		C	Si	Mn
HSA340	1.5/2.0	$\leq 0.10$	$\leq 0.50$	$\leq 1.00$
H340LAD+Z	0.7	0.07	0.01	0.79
材料	化学成分		力学性能	
	P	S	$R_{eL}/MPa$	$R_m/MPa$
HSA340	$\leq 0.03$	$\leq 0/03$	340~420	$\geq 410$
H340LAD+Z	0.022	0.008	379	455

收稿日期: 2006-10-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50475125)

\*参加此工作的还有叶益民

焊接试验材料搭配时, 按照强度相近而厚度不

同的原则,将三种厚度的板材两两搭配进行激光拼焊(表 2)。为了提高焊接质量,要求板料的切口平整光洁,以便保证焊接时不会因为母材搭配间隙过大而产生焊穿现象。

表 2 差厚激光拼焊板材料的搭配选用

Table 2 Arrangement and choice of LWTBs with different thickness

搭配原则	材料 1	厚度 $\delta$ / mm	材料 2	厚度 $\delta$ / mm
强度相近	HSA340	2.0	HSA340	1.5
厚度不同	HSA340	2.0	H340LAD+Z	0.7
	HSA340	1.5	H340LAD+Z	0.7

试验设备为 TLF1500TURBO 型 CO<sub>2</sub> 激光焊接机,采用 He 作为保护气体。焊接时所用的主要焊接工艺参数见表 3。

表 3 差厚激光拼焊板焊接工艺参数

Table 3 Welding parameter of LWTBs with different thickness

序号	差厚板搭配 (mm/mm)	激光功率 $P$ / kW	焊接速度 $v$ / (mm·s <sup>-1</sup> )	氦气流量 $q$ / (L·min <sup>-1</sup> )
1	2.0/1.5	4.5	2.5	25
2	2.0/0.7	5	2.5	25
3	1.5/0.7	5	3.0	25

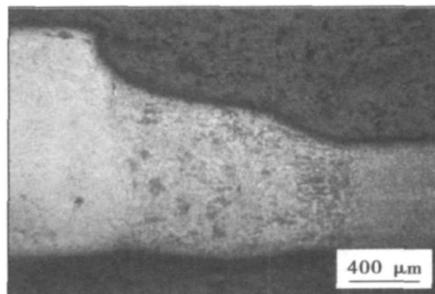
选取具有代表性的焊缝横截面进行金相组织检验分析,并采用 HVS-1000 维氏硬度计对焊缝接头各区域进行硬度测量,分析研究激光焊缝接头各区域金相组织及其硬度的变化情况。

## 2 试验结果与分析

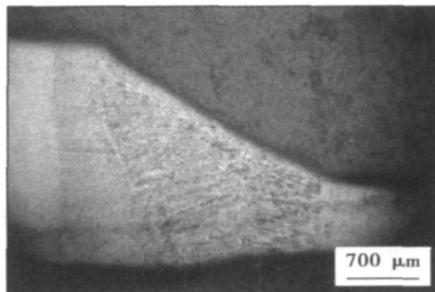
### 2.1 焊接接头形貌

由图 1 可以看出,采用激光焊接方法进行差厚板焊接可以获得成形良好、平滑美观的焊接接头。焊缝中柱状晶垂直于熔池金属与母材金属的分界面,沿结晶方向生长,具有明显的方向性。在激光焊接 0.7 mm/1.5 mm 差厚拼焊板时,由于激光光束的入射位置略偏向 0.7 mm 板一侧,这样薄板侧热输入较大,而厚板侧热输入小,最后导致薄板侧热影响区宽度宽,厚板侧无热影响区,并且在厚板侧母材向焊缝过渡处出现台阶(图 1a)。因此需要通过调整激光光束入射位置(偏向厚侧)或改变光束入射角,来改善接头质量。可见,在差厚激光拼焊板焊接过程中,激光光束的入射位置和入射角度对拼焊板的接

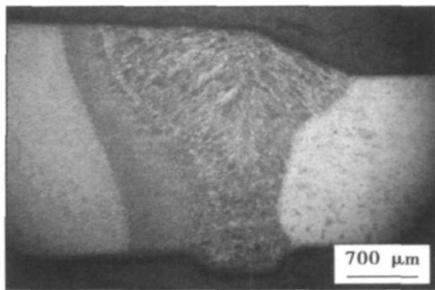
头质量影响很大。对于 0.7 mm/2.0 mm 差厚拼焊板,经过合理地调整激光光束入射位置和入射角度,焊接接头过渡平滑,母材、热影响区、熔合区有明显的边界,在 2.0 mm 板一侧更明显(图 1b)。相比以上两种差厚板的搭配,焊接 1.5 mm/2.0 mm 拼焊板的厚度差最小,焊接的质量也好,激光焊接接头完全焊透,焊缝形状成典型的腰鼓形,母材、热影响区、熔合区的边界明显(图 1c)。由于焊接时激光入射角度相对试样表面法线方向略向厚板一侧倾斜,且光束入射位置也偏向厚板。同样由于两侧母材所受热输入有差异的原因,焊后在厚板侧存在明显的热影响区,而薄板侧则无热影响区。



(a) 1.5 mm/0.7 mm



(b) 2.0 mm/0.7 mm



(c) 2.0 mm/1.5 mm

图 1 差厚激光拼焊板接头形貌图

Fig. 1 Joints of laser welding tailored blanks

### 2.2 焊缝熔合区组织

焊接凝固结晶时,熔池中金属在运动状态下从

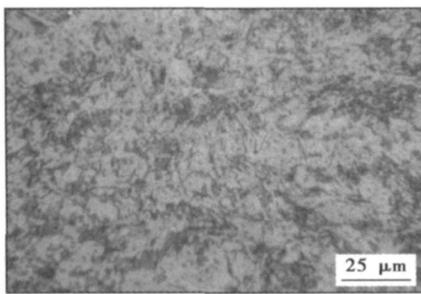
液态开始结晶。焊缝晶粒在熔池壁与母材连接处形核长大,形成柱状晶,且柱状晶的晶轴方向与熔合线附近母材粗晶的晶轴方向一致。这些柱状晶的结晶方向由焊接速度、结晶速度与冷却条件等决定的<sup>[5]</sup>。如图1所示,焊缝的柱状晶都是沿熔合线法线方向生长,在焊缝中心相遇,且柱状晶之间是相互平行的。

对于试验中所用的材料,在焊后熔池凝固形成的一次组织一般是呈柱状的奥氏体组织,这种高温柱状奥氏体在连续冷却条件下进行相变产生二次组织,这就是在室温下焊缝获得的最终金相组织。对于确定成分的焊接熔池金属,凝固以后固态相变最终组织取决于焊缝金属的成分和奥氏体连续冷却相变时的冷却速度。由于激光焊接在大多数情况下属于非填丝的自熔焊接,无外来合金元素填充进入焊缝,因此焊缝处最终获得的金相组织取决于焊缝冷却速度。

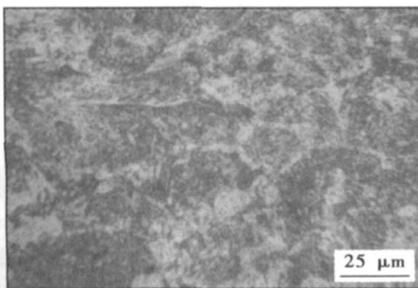
焊接热循环对焊缝最终生成的固态相变组织影响很大。以焊接0.7 mm/1.5 mm差厚拼焊板为例,如图2所示。由于0.7 mm母材为镀锌钢板,锌的沸点为906 °C,在高温下镀锌层中的锌易产生蒸发,带走大量的热,因此焊缝中靠近0.7 mm母材侧的金属散热快;相对的,1.5 mm母材侧的金属散热较慢。焊缝组织从高温下的柱状奥氏体形态开始冷却,由于厚薄两侧材料散热情况不同,因此室温下就表现为焊缝金相组织在各自靠近母材的局部区域有很大

差异。在高温下,焊缝中铸态奥氏体先析出铁素体,靠近1.5 mm母材侧的焊缝金属冷却速度较慢,先析铁素体易长大生成较多数量的块状铁素体、粒状贝氏体及魏氏组织(图2a);在靠近0.7 mm母材侧的焊缝中,焊缝金属冷却速度快,形成的铁素体数量相对较少,且主要分布在晶界上,而上贝氏体数量较多(图2b)。

在激光拼焊板焊缝中总是存在一定数量的板条状马氏体,如图3所示。板条状马氏体的特征是在奥氏体晶粒的内部形成细条状马氏体板条,条与条之间有一定的交角。由于这种马氏体的含碳量低,故也称低碳马氏体。焊缝中马氏体组织的生成,不但与焊缝化学成分有关,更主要的是与焊接方法和焊接冷却条件有关。在激光焊接条件下,焊缝区受到急速加热和冷却,此时奥氏体过冷到 $M_s$ 温度以下就发生马氏体转变,由于母材本身含碳量少,因此焊缝中一般只会出现板条状马氏体。板条状马氏体具有一定的强度,另外,低碳的板条马氏体形成温度高( $M_s$ 点较高),在其形成后过饱和的碳发生部分分解,称自回火,自回火能改善马氏体的韧性。



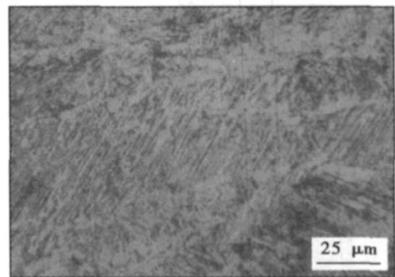
(a) 靠近1.5 mm母材侧焊缝金相组织



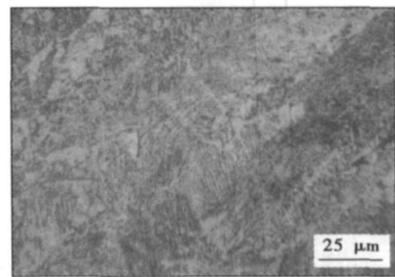
(b) 靠近0.7 mm母材侧焊缝金相组织

图2 焊接热循环对焊缝最终金相组织影响

Fig. 2 Influence of heat cycle on microstructure of weld



(a) 2.0 mm/0.7 mm



(b) 2.0 mm/1.5 mm

图3 焊缝金相组织

Fig. 3 Microstructure of weld

从图3中还可可见晶内有针状铁素体组织存在。针状铁素体的形成温度约在500 °C左右,它是在原始奥氏体晶内以针状分布,是焊缝常见组织。针状铁素体是焊缝中希望的组织,在性能上随着针状铁

素体细小、密集,数量增大而韧性提高。随着针状铁素体粗大,数量减少而性能恶化,尤其是冲击韧度下降严重,因此,针状铁素体的数量对焊缝性能有重大影响<sup>[9]</sup>。

### 2.3 焊接热影响区组织

图4为2.0 mm/1.5 mm 差厚激光拼焊板焊接热影响区的显微组织。从图4a中可以看出,激光焊接后,拼焊板热影响区宽度窄,与母材及焊缝有明显的界线。对于激光拼焊板的热影响区,并无普通焊接方法焊后出现的四大区域之分,而且热影响区晶粒细小,生成的组织也很细密(图4b)。

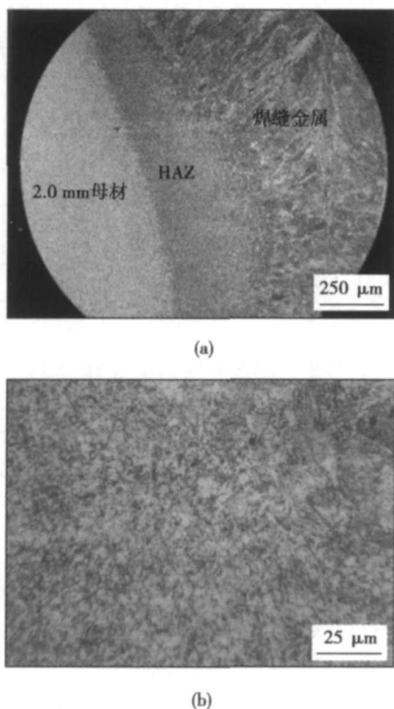


图4 焊接热影响区

Fig. 4 Microstructure of HAZ

焊接热影响区的宽度和显微组织与焊接热输入大小有关,激光焊接时光束入射位置和入射角度大小又影响着接头受热的均匀性。由图1b可以看出,激光焊接时通过合理调整激光光束入射位置和入射角度可以使焊接接头受热均匀,焊缝两侧热影响区宽度大致相等。

### 3 焊缝及热影响区硬度

硬度试验时,从厚侧母材经焊缝到薄侧母材,每隔0.3 mm 测量一个硬度值。焊缝及其热影响区的

硬度分布情况见图5。

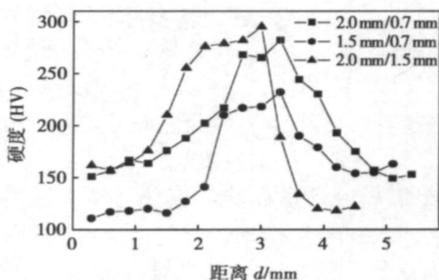


图5 激光拼焊板焊缝硬度分布

Fig. 5 Hardness of weld

从图5中可以看出,三种不同厚度比的差厚激光拼焊板焊缝及热影响区的硬度值均大于母材,热影响区未出现软化现象。

2.0 mm/0.7 mm, 2.0 mm/1.5 mm 两种差厚激光拼焊板由于焊缝组织中出现板条状马氏体(图3),因此焊缝的硬度较高,达到母材硬度的2~3倍;而1.5 mm/0.7 mm 差厚激光拼焊板焊缝显微组织中未出现板条马氏体,因此其硬度较前两种拼焊板低。

另外,焊接2.0 mm/1.5 mm 差厚激光拼焊板时,只在2.0 mm 板侧形成热影响区,而1.5 mm 板侧无热影响区(图1c),因此,硬度值曲线在有热影响区的一侧变化较缓,在无热影响区的薄板侧硬度值是陡降的。

## 4 结 论

(1) 采用激光焊接方法进行差厚拼焊板焊接可以获得成形良好、平滑美观的焊缝接头。通过合理调整激光光束的入射位置和入射角度,可以显著提高拼焊板的接头质量。

(2) 焊接热循环对焊缝最终生成的固态相变组织影响很大。对于差厚激光拼焊板,由于母材的散热情况的不同,最终造成焊缝金相组织在各自靠近母材的局部区域有很大差异。

(3) 在激光拼焊板焊缝中总是存在一定数量的板条状马氏体,晶内还有针状铁素体组织存在。

(4) 激光拼焊板的热影响区宽度窄,与母材及焊缝间有明显的界线,晶粒细小,而且生成的组织也很细密。

(5) 焊缝及热影响区的硬度值均大于母材,无热影响区一侧的硬度值出现陡降。

分析认为,当电极力较小时,界面接触电阻较大,瞬时放电产生电弧,造成界面合金的氧化和熔化金属的飞溅,不仅熔透率低,而且在结合界面上出现大量的氧化夹杂物。但当电极力过大时,界面接触电阻太小而不足以在极短的时间内使界面金属发生熔化,因而不能形成熔接接头,无法实现焊接。只有当电极力在 32~35 N 范围时,界面接触电阻足以熔化金属,而且电极力可及时将氧化夹杂物挤压排出,进而实现 YG5FA 和 45Cr 合金的高质量对接。

### 3 结 论

(1) 硬规范电容储能焊能够实现微型超细颗粒硬质合金与中碳合金钢的焊接。YG5FA/45Cr 结合界面组织细小致密,硬质合金组织无粗化迹象。

(2) 硬质合金储能焊接头的主要缺陷是裂纹。具有典型的脆断特征和延迟特性。裂纹发源于结合面近硬质合金侧中的  $\eta$  相、夹杂和微气孔等应力集中微区,并垂直于结合面(拉应力方向)向硬质合金中扩展。焊后进行 350 °C 保温 30 min 的去应力处理,即可有效地预防裂纹的产生。

(3) 电容、电压和电极力对接头质量均有影响,其中电极力的影响最为显著。在试验条件下,推荐的焊接工艺参数为  $C=12\ 000\sim 13\ 200\ \mu\text{F}$ ,  $U=95\sim 100\ \text{V}$ ,  $F=32\sim 35\ \text{N}$ 。

### 参考文献:

- [1] 吕天宝,彭端元. 2006 年刀具行业展望[J]. 机电新产品导报, 2005(10): 43-44.
- [2] 吴元昌. 2003 年日本硬质合金刀具的变化[J]. 硬质合金, 2004, 21(4): 252-255.
- [3] 熊 翔, 廖奇乔. 我国硬质合金焊接刀片和凿岩工具用硬质合金制品质量现状及其分析[J]. 硬质合金, 1997, (14)2: 45-46.
- [4] Thomas H. 世界上最小的集成电路钻头——ALPHA 4 PLUS Miro[J]. 机电新产品导报, 2005(10): 64-65.
- [5] 段明扬, 杨 玲. 硬质合金焊接技术研究[J]. 机械工艺师, 1996, 127(5): 25-28.
- [6] 徐培全, 杨德新, 赵秀娟, 等. WC-Co 系硬质合金 TIG 焊接头界面扩散分析[J]. 上海交通大学学报, 2005, 39(7): 1050-1054.
- [7] 徐培全, 杨德新, 赵秀娟, 等. Ni-Fe-C 对 YG30 硬质合金与 45 钢 TIG 焊过程中  $\eta$  相形成的影响[J]. 稀有金属与硬质合金, 2003, 31(2): 18-23.
- [8] 袁建国, 蒋华山. 电容储能焊放电过程对焊接质量的影响[J]. 电焊机, 2006, 36(1): 31-32.
- [9] Ellis M B D. Joining of aluminium based metal matrix composites [J]. International Materials Reviews, 1996, 41(2): 1-58.
- [10] Paul B K, Wilson D D, McDowell E, et al. Study of weld strength variability for capacitor discharge welding process automation [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2004, 6(2): 109-115.
- [11] Xu Jinpeng, Zhai Qiuya, Jing Yong. Energy-storage welding connection characteristics of rapidly solidified Cu-Co alloy foils [J]. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 2004, 14(4): 785-789.

作者简介: 翟秋亚, 女, 1963 年出生, 硕士, 副教授。主要从事先进材料及其焊接方面的研究工作。发表论文 40 余篇。

Email: qiyazhai@xaut.edu.cn

[上接第 12 页]

致 谢: 在激光焊接研究过程中, 得到上海交通大学激光制造实验室吴毅雄教授、蔡艳老师以及几位博士的帮助, 在此作者向他们表示感谢。

### 参考文献:

- [1] 崔怀洋, 陈 铠, 左铁钊. 镀锌钢板的 CO<sub>2</sub> 激光焊接性[J]. 焊接学报, 2004, 25(4): 115-118.
- [2] Tusek J, Kampus Z, Suban M. Welding of tailored blanks of different materials[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 119

(1-3): 180-184.

- [3] 陈彦宾. 现代激光焊接技术[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [4] 朱 强, 雷玉成, 陈 炜, 等. 高强度钢激光拼焊板在车身制造中的应用[J]. 中国焊接产业, 2006, 4(7): 24-28.
- [5] 吕德林, 李砚珠. 焊接金相分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- [6] 雷玉成, 朱 强, 王建中, 等. ST14 钢激光拼焊板焊缝组织及成形性能分析[J]. 焊接学报, 2006, 27(7): 25-28

作者简介: 雷玉成, 男, 1962 年出生, 博士, 教授, 博士生导师。主要从事焊接工艺及设备, 焊接过程控制及模拟, 先进材料连接技术等方面的研究与开发工作。发表论文 70 余篇。

Email: yckei@uj.sjtu.edu.cn

## MAIN TOPICS, ABSTRACTS & KEY WORDS

### Vision based identification model and extracting algorithm of wire extension in aluminum MIG alloy welding process

SHI Yu<sup>1</sup>, HUANG Jiankang<sup>2</sup>, FAN Ding<sup>1</sup>, XUE Cheng<sup>2</sup> (1. Key Laboratory of Non-ferrous Metal Alloys, The Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. State Key Laboratory of Gansu Advanced Non-ferrous Metal Materials, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China). p1-4

**Abstract:** A vision sensing system and corresponding image-processing algorithm for extracting the information of wire extension during aluminum MIG (metal inert-gas) welding process have been presented. The images of welding area are real-time captured by CCD camera. According the character of the wire in the image, its ordinate can be located by image processing algorithm. After image clipping, shifting and superposing, the difference between wire and background in the image will be enhanced, and then the information of wire extension can be extracted accurately. Experiments show that this method is effective and feasible. Based on the step response experimentation, the influence of wire speed on wire extension is identified and the mathematic model has been set. It provides the theoretical basis to realize the wire extension sensing and control in aluminum MIG welding process.

**Key words:** wire extension; vision sensing system; aluminum alloy; metal inert-gas welding; system identification

### Full digital inverter power supply for CO<sub>2</sub> arc welding based on ARM controller

ZHU Jinhong, LU Kaitong, SHI Hongxin, LI Guowei (School of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, Henan, China). p5-8

**Abstract:** A full digital inverted power supply based on LPC2131 ARM controller for CO<sub>2</sub> arc welding was developed, and the control strategy of short circuiting transfer was proposed. In this system, arc voltage is preset in accordance with the speed of a separate wire feeder, while output current during short circuiting period can be adjusted independently. The digital pulse width modulation signals are generated directly at low hardware expense, and control strategy is implemented through software algorithm. The simplified configuration shows high reliability, and control program can also be updated via upgrade interface for property enhancement.

**Key words:** full digital power supply; inverter; CO<sub>2</sub> arc welding; short circuiting transfer

### Analysis about formation and microstructure of laser-welding-tailored-blanks with unequal thickness of high strength steels

LEI Yucheng, ZHU Qiang, CHEN Wei, CHENG Xiaonong, YE Yiming (School of Material Science and Engineering, Jiangsu Uni-

versity, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China). p9-12, 16

**Abstract:** Two kinds of high-strength-steel sheets, HSA340 (2.0 mm, 1.5 mm) and H340LAD+Z (0.7 mm), were introduced. They were arranged in pairs and welded together by laser welding on principle of similar strength but unequal thickness. The special cross-section of welded joints was chosen for metallographic examination and hardness measurement. The results show, in the welding process, the microstructure of the weld will have great diversity at local region closing each parent metal because of the different cooling condition of each parent metal. The width of heat affected zone (HAZ) in laser-welding-tailored-blanks is narrow, the remarkable boundary divides the HAZ with the parent metal and weld, and not only the grain size but also the microstructure in the HAZ are also fine. And the hardness of the weld and the HAZ are higher than that of parent metal. The joints of tailored blanks will be obviously improved when the incident position and incident angle of laser beam were set rationally.

**Key words:** high strength steel; laser welding; tailored blanks; unequal thickness

### Microstructure of small diameter cemented carbide YG5FA / 45Cr steel joined by capacitor discharge welding

ZHAI Qi-uya, XU Jinfeng, CAI Zaisheng (School of Material Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China). p13-16

**Abstract:** The butt welding of  $\Phi$ 1.5 mm ultrafine grain cemented carbide YG5FA and 45Cr steel was performed by using a micro-type capacitor discharge welding machine. The structure characteristic of weld interface, microstructural morphology and joining mechanism were investigated, and the effect of welding parameters on joint quality is also analyzed. The results show that the capacitor discharge welding can realize the rapid solidification joining of the cemented carbides. This method can efficiently prevent the interface reaction and the joint with fine and dense microstructure is obtained. The microstructure of cemented carbide has no coarsening appearance. The crack is the main welding defect in cemented carbide joint, which has typical brittle and delay characteristic, the welding crack could be effectually eliminated by annealing of 350 °C/30 min after welding.

**Key words:** small diameter cemented carbide; 45Cr steel; capacitor discharge welding; interface microstructure.

### Supervising and management on states of digital-controlled inverter arc welding power supply in real-time

ZHOU Xuezheng, ZHU Zhiming, FU Cejian, JI Shenru (Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University; Key Laboratory for Ad-