

# HS-80 高强钢焊丝激光-MAG 复合焊熔敷金属特性

雷 振<sup>1</sup>, 滕 彬<sup>1</sup>, 王旭友<sup>1</sup>, 赵旭东<sup>2</sup>

(1. 机械科学研究院 哈尔滨焊接研究所, 哈尔滨 150080;  
2. 利勃海尔机械(大连)有限公司, 大连 116600)

**摘要:** 研究了 HS-80 焊丝激光-MAG 复合焊和 MAG 焊两种焊接方法的熔敷金属特性。与 MAG 焊相比, 激光-MAG 复合焊熔敷金属的屈服强度、抗拉强度和冲击韧度显著提高, 熔敷金属的组织更加细小, 合金元素过渡系数增大。高速焊接导致的熔池金属冷却速度快及熔池金属流动性的增加是导致复合焊熔敷金属组织细化的主要原因。焊缝金属中 Ti, Mo 等细化晶粒元素含量的增加也是焊缝组织发生细化的一个重要原因。熔敷金属组织晶粒细化及由合金元素过渡系数增大而引起的合金元素含量的增加是激光-MAG 复合焊熔敷金属综合力学性能提高的主要原因。

**关键词:** 低合金高强钢焊丝; 熔敷金属; 激光; 复合焊

中图分类号: TG115.28 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2011)08-0037-05

雷 振



## 0 序 言

激光-电弧复合焊接技术是 20 世纪 70 年代末出现的一种新兴焊接技术<sup>[1-2]</sup>。经过近 30 年的研究与发展, 该焊接技术已经逐渐成熟和完善。特别随着近几年来大功率固体激光器制造技术的进一步发展, 激光-电弧复合焊焊接技术已经逐渐成为了一种优质、高效的新兴焊接技术, 并已经在汽车制造、石油化工、压力容器、造船、航空航天等领域得到了一定的应用<sup>[3-6]</sup>, 被焊金属材料涉及不锈钢、高强钢、铝合金、镁合金等高性能材料。在这些金属材料中低合金高强钢因其综合性能优异, 经济效益显著, 多用于重要的焊接结构中, 目前, 在建筑、桥梁、船舶、石油化工、工程机械、压力容器、海洋工程、核能等重要工业领域得到了较为广泛的应用。但是, 由于当前市场上与低合金高强钢焊接匹配的弧焊材料基本上都是依据常规弧焊的工艺特点和冶金规律设计开发的, 而激光-电弧复合焊接技术具有其独特的工艺和冶金特点, 因此研究低合金高强钢焊接材料的激光-电弧复合焊熔敷金属焊接特性规律具有重要的工程意义。

选择 HS-80 低合金高强钢焊丝, 分别进行了激光-MAG 复合焊接及常规 MAG 焊熔敷金属试验

研究, 对熔敷金属的力学性能、化学成分、金相组织、断口特征进行了测试分析, 通过对两种焊接方法熔敷金属冶金性能特征的对比分析, 探讨了 HS-80 低合金高强钢焊丝激光-MAG 复合焊熔敷金属特性规律。

## 1 试验方法

试验采用高强钢焊丝为哈尔滨焊接研究所自行研制的直径为 1.2 mm 的 HS-80 低合金高强钢焊丝。焊丝的化学成分见表 1。

表 1 HS-80 焊丝的化学成分(质量分数, %)  
Table 1 Chemical composition of HS-80 welding wire

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Ti	Fe
0.09	0.55	1.68	<0.01	<0.01	0.024	1.02	0.43	0.09	余量

试验所用激光器为额定功率 2 kW 的连续波 Nd: YAG 激光器, 试验中采用焦距为 200 mm 的激光输出透镜; 所用焊机为奥地利 Fronius 公司生产的 TPS5000 型数字化 MAG/MIG 焊机, 焊接过程采用脉冲 MAG 焊, 过渡形式为 1 滴/脉冲。

利用激光-MAG 复合焊和常规 MAG 两种焊接方法分别进行 HS-80 低合金高强钢焊丝熔敷金属性能试验, 试验依据国家标准 GB/T 17493—1998 进行, 采用 80% Ar + 20% CO<sub>2</sub> 混合保护气。两种焊接方法的主要焊接工艺参数见表 2。

表2 焊接工艺参数  
Table 2 Welding parameters

焊接速度 $v/(m \cdot min^{-1})$	电流 $I/A$	电压 $U/V$	激光功率 $P/W$	层间温度 $T/^\circ C$
复合 MAG	1.0 0.33	271 270	28.9 30	1 200 —
				120 ± 10

焊后对熔敷金属试样进行抗拉强度、低温冲击性能测试; 对两种焊接方法熔敷金属的化学成分、组织及其断口进行对比分析; 研究两种焊接方法下的合金元素过渡规律。通过对分析两种焊接工艺方法下熔敷金属的性能、组织、成分, 探索了低合金高强钢焊丝激光-MAG 复合焊熔敷金属焊接特性的规律。

## 2 试验结果及讨论

### 2.1 熔敷金属力学性能

依据国家标准 GB/T 17493—1998 对熔敷金属进行了常温拉伸试验和 -20 ℃ 冲击韧度试验( 拉伸试验取 2 个试样, 冲击试验取 5 个试样), 试验结果分别见表 3 和表 4 ( 表中数值为多个试样测试结果的平均值)。

表3 拉伸试验结果  
Table 3 Results of tension test

类别	抗拉强度 $R_m / MPa$	屈服强度 $R_{el} / MPa$	断后伸长率 $A(%)$
复合	933	903	17.8
MAG	850	768	22

表4 冲击试验结果  
Table 4 Results of impact test

类别	-20 ℃ 冲击吸收功 $A_{KV} / J$	侧向膨胀率 $B(%)$	脆性区间面积比 $S(%)$
复合	127	16.24	13.4
MAG	86	10.68	33.24

从表 3 可以看出, 与常规 MAG 焊熔敷金属相比, 激光-MAG 复合焊熔敷金属的抗拉强度和屈服强度显著提高, 抗拉强度达到了 933 MPa, 其强度指标已经远远超过了 HS-80 低合金高强钢焊丝的设计指标( 该焊丝依据常规 MAG 焊工艺特点和冶金规律设计, 设计强度指标为 800 MPa)。利用激光-MAG 复合焊焊接可以在采用 800 MPa 级的低合金高强钢焊丝的情况下达到 900 MPa 级强度的焊接效果。

表 4 为熔敷金属 -20 ℃ 低温冲击韧度测试结

果。从表 4 中可以看出, 激光-MAG 复合焊熔敷金属的冲击吸收功要明显高于常规 MAG 焊熔敷金属的冲击吸收功( 约提高了 47.7%)。对冲击试样的侧向膨胀率及冲击断口脆性区间所占的面积比进行了测量和计算( 表 4)。从表 4 中可以看出, 激光-MAG 复合焊熔敷金属冲击试样的平均侧向膨胀率远大于常规 MAG 焊试样, 且前者冲击断口的脆性区间面积比也要小于后者, 说明激光-MAG 复合焊熔敷金属的冲击韧度优于常规 MAG 焊熔敷金属的冲击韧度。

### 2.2 金相组织及断口分析

图 1 为熔敷金属焊缝及焊缝重热区金相组织。从图 1 可以看出, 两种熔敷金属焊缝及焊缝重热区的组织基本相同, 均为贝氏体组织, 但是激光-MAG 复合焊熔敷金属的焊缝及焊缝重热区组织要比常规 MAG 焊熔敷金属相同区域的组织更为细小, 这也是激光-MAG 复合焊熔敷金属综合性能( 高强度、高韧度) 优于常规 MAG 焊熔敷金属综合性能的主要原因之一。

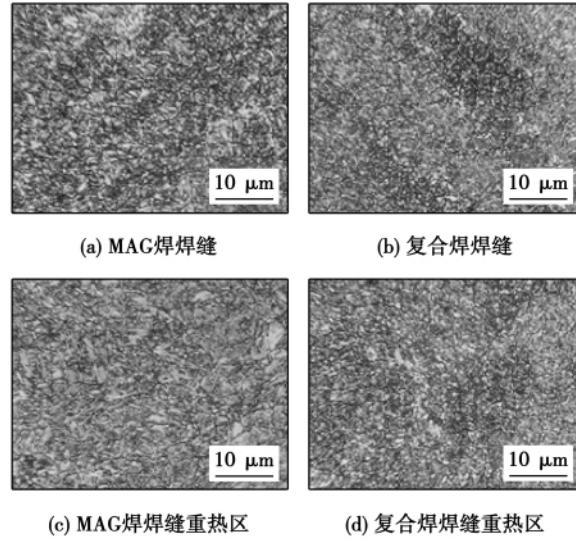
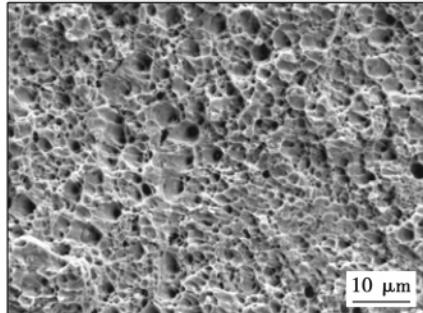


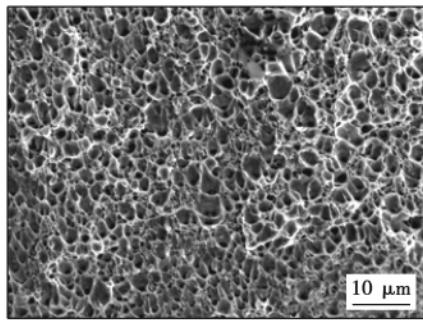
图1 焊缝金相组织  
Fig. 1 Microstructure of weld

图 2 为两焊接方法的熔敷金属拉伸试样断口的微观形貌。从图 2 中可以看出, 两试样的拉伸断口形貌基本相同, 均为韧窝状断口, 表明拉伸试样的断裂方式均为韧性断裂。图 3 为两焊接方法的熔敷金属冲击试样宏观断口形貌。从图 3 中的宏观断口形貌可以看出, 常规 MAG 焊熔敷金属冲击断口的脆性区间较大( 图 3a 中 B 位置), 脆性区间断口较为平整, 在光线较亮的情况下可以看到白亮的“小刻面”, 其脆性断裂痕迹非常显著; 与常规 MAG 焊相

比 激光 - MAG 复合焊熔敷金属冲击断口的脆性区间较小 脆性断口区域并不是很平整的 ,有韧性断裂的痕迹 其脆性断裂痕迹并非十分显著( 图 3b 中 B 位置) .



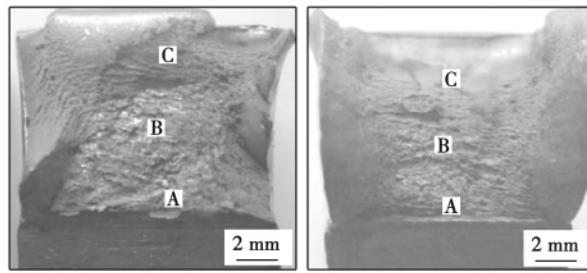
(a) MAG焊



(b) 复合焊

图2 拉伸断口微观形貌

Fig. 2 Micro-appearance of tension fracture



(a) MAG焊

(b) 复合焊

图3 冲击断口宏观形貌

Fig. 3 Impact fracture appearance

为了更好地分析冲击试样的断口特征 ,分别对两冲击试样断口的起裂区( A 位置)、扩展区( B 位置)和撕裂区( C 位置)进行了扫描电镜微观断口分析 不同区域的断口 SEM 形貌见图 4 和图 5.

图 4a 和图 5a 分别为两冲击试样断口起裂区的断口形貌 在该区域的两断口均为韧窝状断口 但是与常规 MAG 焊相比 ,激光 - MAG 复合焊断口的韧窝较深 表明该区域的韧度要好于常规 MAG 焊试样. 图 4b 和图 5b 分别为两冲击试样断口扩展区的断口形貌. 从图 4b 和图 5b 可以看出 ,常规 MAG 焊冲击试样在该区域的断口为准解理断口 ,其断裂方式为典型的脆性断裂 ,而激光 - MAG 复合焊冲击试样在该区域的断口则是一种以韧窝状断口特征为主 ,同时又具有准解理断口特征的混合断口 断口中韧窝相对较浅 ,表明具有一定的韧度 ,但韧度不足 ,

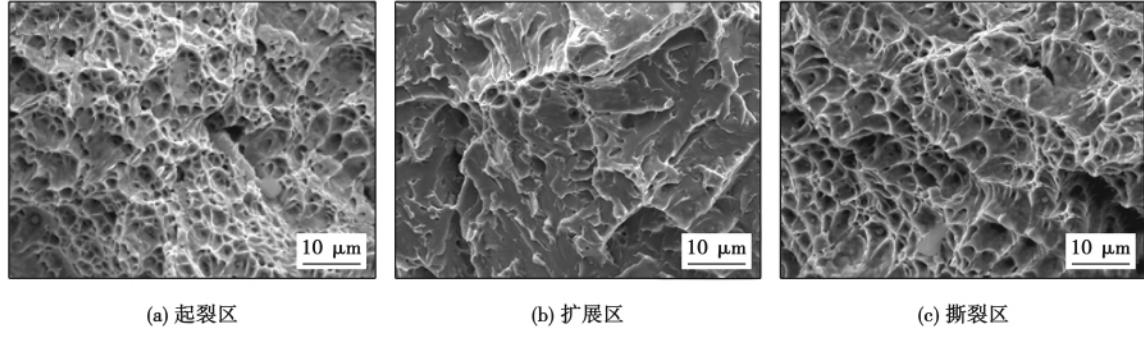


图4 MAG 焊熔敷金属冲击断口微观形貌

Fig. 4 Micro-appearance of impact fracture for deposited metal by MAG welding

其断裂方式应当是一种以韧性断裂为主、脆性断裂为辅的混合断裂. 冲击断口中脆性断裂区间的大小和断裂特征是衡量高强钢冲击韧度好坏的一个重要指标 ,而激光 - MAG 复合焊熔敷金属冲击试样断口中脆性区间的面积较小 ,且该区间的断口特征表明其断裂过程具有了较好的韧度 ,断裂方式不再完全是脆性断裂 ,说明熔敷金属具有优良的韧度. 图 4c

和 5c 分别为两冲击试样断口撕裂区的断口形貌 ,该区域的断口形貌与起裂区的断口形貌相似 ,均为韧窝状断口 ,且激光 - MAG 复合焊冲击断口的韧窝相对较深 表明在该区域激光 - MAG 复合焊冲击试样的韧度也要好于常规 MAG 焊试样.

通过对两种焊接方法熔敷金属冲击断口的综合对比分析发现 ,利用激光 - MAG 复合焊焊接低合金

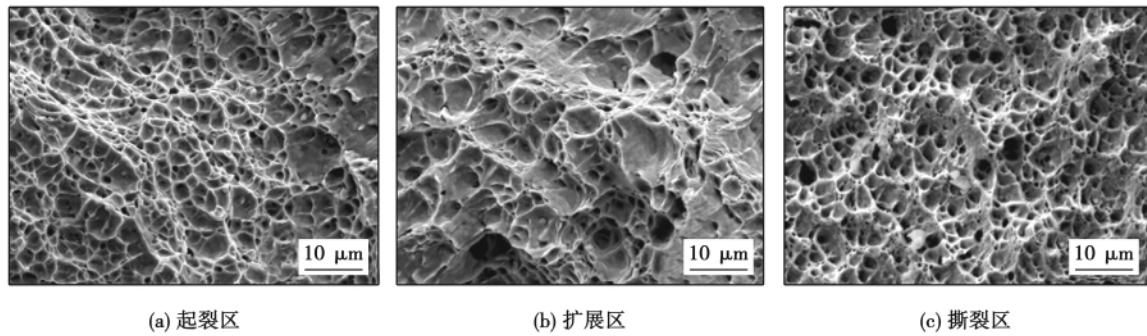


图5 复合焊熔敷金属冲击断口微观形貌

Fig. 5 Micro-appearance of impact fracture for deposited metal by hybrid welding

高强钢时,不但可以提高熔敷金属的抗拉强度,同时可以显著地提高熔敷金属的韧度,从而获得综合力学性能优异的焊缝金属。

### 2.3 化学成分及合金元素过渡系数分析

表5为两种焊接方法熔敷金属试验的主要合金元素过渡系数。从表5可以看出,激光-MAG复合焊熔敷金属的元素过渡系数均大于常规MAG焊熔敷金属的元素过渡系数。焊接过程中合金元素的损失主要来自于合金元素的烧损和挥发,其中合金元素的烧损是主要因素。激光-MAG复合焊熔敷金属的合金元素过渡系数提高表明焊接过程中合金元素的烧损减少,过渡到焊缝金属中的合金元素增加,从而在一定程度上改变了焊缝金属的力学性能。在HS-80低合金高强钢焊丝中,Si,Mn,Ni,Mo,Ti元素是除C元素之外的主要强化或韧化元素,其中Si,Mn,Mo,Ti元素是主要的强化元素。随着这些合金元素的增加,可以显著提高钢的弹性极限、屈服强度和抗拉强度,且通过适当控制这些合金元素,其含量的增加不会显著降低焊缝金属的塑性和韧度。

表5 合金元素的过渡系数(%)

Table 5 Alloying element transition coefficient(%)

	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Ti
复合	78.6	88.2	91.7	94.5	97.8	39.4
MAG	73.2	82.6	91.7	91.8	95.6	29.3

此外,Mo,Ti元素均是细化晶粒的微合金元素,特别是Ti元素可以使焊缝金属组织更加致密,在细化晶粒的同时,能降低时效敏感性和冷脆性,并且在其含量不太高时,可以提高焊缝金属的韧度。Ni元素是提高焊缝金属低温缺口韧度最需要的合金元素之一,Ni元素具有明显降低冷脆转折温度的作用<sup>[6]</sup>。提高焊缝金属中镍的含量是保证焊缝金属在较高的抗拉强度下获得良好韧度的有效手段。

通过对焊缝金属的化学成分及合金元素的过渡系数分析表明,与常规MAG焊相比,激光-MAG复合焊焊接过程中合金元素的过渡规律有着较大的差异。激光-MAG复合焊焊接过程中合金元素的烧损量减少,过渡系数提高,使得焊缝金属中合金元素的含量增加。从焊丝中过渡到焊缝金属中的强化和韧化元素的增加也是激光-MAG复合焊焊缝金属综合力学性能提高的一个原因。

## 3 讨论

综合分析表明,在低合金高强钢熔敷金属试验中,激光-MAG复合焊与常规MAG焊的焊接特性规律有很大差异,获得的激光-MAG复合焊熔敷金属的强度和韧度显著提高,可以利用低一级别强度等级的普通低合金高强钢焊丝得到高强度、高韧度的焊接效果,从而降低焊接材料成本,提高经济性。由此可见,在低合金高强钢的焊接中,激光-MAG复合焊和常规MAG焊两种焊接方法的焊材与母材匹配规律不再相同。激光-MAG复合焊可以实现焊材与母材的低强匹配而获得等强度的焊接效果。

激光-MAG复合焊提高熔敷金属综合力学性能的原因主要有两个方面的因素:化学成分因素和组织因素。化学成分因素对焊缝金属综合性能的影响主要是由焊缝金属中起强化和韧化作用的合金元素含量的增加所致,合金元素含量的增加主要是由于焊接过程中合金元素的烧损量减少、过渡系数提高造成的。组织因素对焊缝金属综合力学性能的影响主要是因为激光-MAG复合焊熔敷金属的焊缝组织更加均匀细小,对焊缝金属产生了细晶强化作用。由于金属化学成分的变化也是焊缝组织产生细化的一个重要原因,因此化学成分因素和组织因素并非是相互孤立的,它们之间具有一定的联系。

导致激光-MAG复合焊熔敷金属组织均匀细

小的原因主要有三方面因素。(1)因为激光 - MAG 复合焊的焊接速度较高(通常为常规 MAG 焊的数倍),在高速的焊接过程中,其焊接热输入相对较小,焊缝金属的冷却速度较快,因此焊后得到的焊缝组织较为细小。这也是造成组织细化的最主要因素。(2)相关研究结果表明,激光 - MAG 复合焊焊缝熔池金属的流动速度比相同条件下的常规 MAG 焊熔池金属的流动速度提高了 70% 左右<sup>[7]</sup>,熔池金属的剧烈流动将会不断撞击结晶前沿的半凝固态金属,有利于该区域的枝晶破碎,防止生成粗大的枝晶组织,焊后易于得到均匀细小的焊缝组织。(3)激光 - MAG 复合焊接过程中元素过渡系数的提高,使得 Ti,Mo 元素等细化晶粒元素增加,而增加的这些合金元素增强了焊缝金属的细晶强化效果。但是由于焊缝金属中细化晶粒元素的增加量是有限的,其细化晶粒的能力也是有限的,因此这一因素对焊缝金属组织细化的贡献相对较小。

## 4 结 论

(1)与常规 MAG 焊相比,激光 - MAG 复合焊熔敷金属的屈服强度、抗拉强度及其韧度显著提高。利用激光 - MAG 复合焊焊接可以用低强度等级的普通低合金高强钢焊丝获得高强度、高韧度的焊接效果,实现焊材与母材的低强匹配,从而降低焊接材料成本,提高经济性。

(2)与常规 MAG 焊相比,激光 - MAG 复合焊的合金元素过渡规律有着较大的差异,激光 - MAG 复合焊的元素过渡系数明显提高。

(3)与常规 MAG 焊相比,激光 - MAG 复合焊熔敷金属的焊缝组织明显细化,晶粒细化的原因主

要是由高速焊接所致的熔池金属快速冷却以及激光加剧了熔池金属的流动特性造成的。元素过渡系数提高,致使焊缝金属中 Ti,Mo 元素等细化晶粒元素含量的增加也是焊缝组织发生细化的一个重要原因。

(4)熔敷金属焊缝晶粒的细化及焊缝金属中强化、韧化元素的增加是造成激光 - MAG 复合焊熔敷金属综合性能提高的主要原因。

## 参考文献:

- [1] Steen W M. Arc augmented laser processing of materials [J]. Journal of Application Physics ,1980 ,51( 11 ) : 5636 – 5641.
- [2] Nobuguki A ,Yasushi K. Dynamic observation of speed laser-arc combination welding of thick steel [J]. Section G – ICALEO( 1 ), 1997 ,155 – 163.
- [3] Dilthey U. Prospect by combining and coupling laser beam and arc welding processes [J]. Welding in the World ,2000 3: 37 – 46.
- [4] Haferkamp H ,Ostendorf A. Nd: YAG laser MIG hybrid welding of zinc-coated fine sheet metal and magnesium materials [J]. Laser-Opto 2001 ,33( 1 ) : 61 – 63.
- [5] Bruggemann G ,Mahrle A ,Benyiger T. Comparison of experimental determined and numerical simulated temperature fields for quality assurance at laser beam welding of steels and aluminum alloy [J]. NDT & E International ,2000 ,33( 1 ) : 453 – 463.
- [6] Roland F ,Lembeck H. Laser beam welding in shipbuilding—experience and perspectives at Meyer shipyard [C] // 7th International Aachen Welding Conference( 1 ), 2001.
- [7] 徐孝福. Nd: YAG 激光 - 短路过渡 GMAW 复合热源焊接特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨焊接研究所, 2008.

**作者简介:** 雷 振 男,1981 年出生,硕士,工程师。主要从事激光加工及激光—电弧复合焊热源技术方面的研究工作。发表论文 20 余篇。Email: laser\_lei@ 126. com

tions are researched. The results are discussed properly and verified. The calculated results are in agreement with the experimental-measured values.

**Key words:** T-joint; finite element simulation; thermal transfer coefficient; temperature distribution

**Characteristics of metal deposited by laser-MAG hybrid welding with HS-80 welding wire** LEI Zhen<sup>1</sup>, TENG Bin<sup>1</sup>, WANG Xuyou<sup>1</sup>, ZHAO Xudong<sup>2</sup>( 1. Harbin Welding Institute , China Academy of Machinery Science & Technology , Harbin 150080 , China; 2. Liebherr Machinery ( Dalian ) Co. , Ltd. , Dalian 116600 , China) . p 37 – 41

**Abstract:** The mechanical properties and welding metallurgy laws of deposited metal of HS-80 welding wire by laser-MAG hybrid welding and MAG welding were studied. The results showed that the yield strength , tensile strength and impact work of the deposited metal by laser-MAG hybrid welding were all enhanced observably compared with those by MAG welding , and the microstructure was finer. Meanwhile the alloying element transition coefficient of laser-MAG hybrid welding was increased. In the laser-MAG hybrid welding process , the weld puddle cooled quickly at the high welding speed and the laser beam made the weld puddle flow acutely. These two technology factors were the main reasons of grain refinement. Moreover the content increasing of some elements such as Ti and Mo , which can make grain finer , was another reason of grain refinement. The grain refinement of the microstructure and the content of alloying elements increasing due to the improving of alloying element transition coefficient were the main reasons that enhanced the toughness and mechanical strength of deposited metal by laser-MAG hybrid welding.

**Key words:** welding wire for low alloy high strength steel; deposited metal; laser; hybrid welding

**Analysis and volta potential measurement of second phases in friction stir welding seam of 7A52 aluminum alloy**

ZHANG Ping , LI Qi , ZHAO Junjun ( National Defense Key Laboratory for Remanufacturing Technology , Academy of Armored Forces Engineering , Beijing 100072 , China) . p 42 – 44

**Abstract:** The species , size and volta potential of intermetallics of friction stir welding seam of 7A52 aluminum alloy have important influence on its corrosion behavior. The intermetallics of the welded seam were observed and characterized with metallographic microscope , scanning electron microscope , energy dispersive spectrometer and scanning Kelvin probe force microscope , and the volta potential of the welded seam was tested. The results indicate that the irregularly shaped intermetallics Al-FeMnSi and Mg<sub>2</sub>Si disperse in the welded seam , which sizes are several microns and volta potentials are lower than the matrix. The volta potential of Mg<sub>2</sub>Si is lower than that of AlFeMnSi intermetallics , which means that Mg<sub>2</sub>Si is easier to be corroded in erosive environments. The results lay the foundation of studying corrosion behavior of friction stir welding seam of 7A52 aluminum alloy.

**Key words:** 7A52 aluminum alloy; friction stir welding; welded seam; intermetallics; volta potential

**Tracer investigation of convection in weld pool under TIG welding process** LI Dongjie , LU Shaping , LI Dianzhong , LI Yiyi ( Shenyang National Laboratory for Materials Science , Institute of Metal Research , Chinese Academy of Sciences , Shenyang 110016 , China) . p 45 – 48

**Abstract:** Tungsten particles were chosen as the trace-element to investigate the pattern of the Marangoni convection on the pool surfaces of conventional TIG and double shielded TIG weld and to study the mechanism of the TIG weld shape variation. Before welding , the 300 – 500 micron size tungsten particles were uniformly smeared on the surface of work piece which were inserted two tungsten plates at the pool bottom to separate the weld pool center area and the edge region. For conventional TIG welding process , outward Marangoni flow existed on the pool surface and the tungsten particles concentrated in the two edges at the pool bottom. For double shielded TIG process , an inward Marangoni convection on the molten pool surface and tungsten particles located on the pool center between the two tungsten plates. Tracer test proved the flow direction of the weld pool in the TIG process and verified the active element could change the direction of the Marangoni convection.

**Key words:** TIG welding; tracer test; Marangoni convection; tungsten particles

**Numerical analysis of residual stress on magnesium alloy and stainless steel butt joint by hybrid laser-TIG welding**

LI Xunbo<sup>1</sup> , WU Gang<sup>1</sup> , ZENG Zhi<sup>1</sup> , WANG Jinxia<sup>2</sup> , ZHAO Gang<sup>2</sup> ( 1. School of Mechatronics Engineering , University of Electronic Science and Technology of China , Chengdu 611731 , China; 2. Chengdu Hanyan Weida Automatic Welding Equipment Co. , Ltd , Chengdu 610300 , China) . p 49 – 52

**Abstract:** The AZ31B magnesium alloy and 304L stainless steel butt joint were obtained in laser-TIG hybrid welding. A new coupled heat source model was developed , which combined by double-elliptic planar distribution , double-ellipsoid body distribution and Rotary-Gauss body distribution model. The thermo-mechanical behavior and residual stresses distribution of the butt joint were analyzed by using finite element techniques. The results show that the temperature distribution of the dissimilar metal hybrid weld joint is different , and the residual stress on the 304L stainless steel plate is lower than that on the AZ31B magnesium plate.

**Key words:** magnesium alloy; stainless steel; hybrid welding; residual stress

**Solderability and microstructure of Sn-9Zn-xPr lead-free solder** XUE Peng<sup>1</sup> , XUE Songbai<sup>1</sup> , SHEN Yifu<sup>1</sup> , YE Huan<sup>1</sup> , XIAO Zhengxiang<sup>2</sup> ( 1. College of Materials Science and Technology , Nanjing University of Aeronautics and Astronautics , Nanjing 210016 , China; 2. Sany Heavy Industry Co. , Ltd , Changsha 410100 , China) . p 53 – 56

**Abstract:** The effects of Pr on the wettability of Sn-9Zn lead-free solder and the mechanical properties of soldered joints are investigated and the results indicate that with the addition of rare earth Pr into Sn-9Zn solder , the microstructure is refined obviously ,Zn-rich phase is decreased and mechanical properties