

紫铜厚板 GTAW 热裂纹形成原因分析

于汉臣¹, 闫 涵², 栾天旻¹, 范 玮¹, 张汇文³

(1. 哈尔滨工业大学 先进焊接与连接国家重点实验室, 哈尔滨 150001; 2. 兰州理工大学 机电工程学院, 兰州 730050; 3. 哈尔滨焊接研究院有限公司, 哈尔滨 150028)

摘 要: 热裂纹是紫铜厚板气体保护焊接所面临的主要问题, 为了找出在紫铜焊接热裂纹中起主要作用的因素, 研究了采用 HS201 焊丝进行紫铜厚板钨极氦气体保护焊接 (GTAW) 的热裂纹倾向问题, 通过在空气中和充氦密闭环境中的刚性拘束裂纹试验的裂纹率, 评定了热裂纹敏感性, 指出了热裂纹的产生原因, 结合填充材料、熔覆金属的高温延性, 提出了热裂纹抑制方法. 结果表明, 热裂纹的形成原因是焊丝脱氧能力较差, 导致氧侵入焊缝形成的 Cu 元素和铜的低熔共晶, 在一次结晶的柱状晶晶界处偏聚, 低熔共晶在应力下开裂.

关键词: 紫铜; 热裂纹; 气体保护电弧焊

中图分类号: TG 444.74 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.2018390207

0 序 言

紫铜具有优异的拉伸性能、抗磨性能、导电性和导热性, 是制造电工器材及导热器材的理想材料^[1]. 目前工程中应用最多的是 GTAW 焊接工艺^[2]. 采用 GTAW 工艺焊接紫铜构件时, 当紫铜板厚度超过 4 mm, 就需要对其预热^[3]. 预热和保温的工艺较复杂, 焊缝容易出现热裂纹^[4-5]. 为了消除热裂纹, 往往需要对工件进行焊后热处理, 导致工作环境恶劣, 降低了生产效率. 因此, 为了从根源上消除热裂纹, 提高生产率. 分析 GTAW 焊接工艺下, 焊缝中热裂纹产生的原因, 在工程应用中, 具有重要的意义.

一般认为, 产生热裂纹通常主要有冶金因素和力学因素两方面的原因. 冶金因素, 即紫铜中的杂质元素, 如氧的存在, 导致 Cu₂O 和 Cu 元素的低熔共晶出现; 力学因素, 即焊缝金属在脆性温度区间内的延性与拉伸应变比较小^[6].

焊缝中的氧通常有两个来源^[7], 一是空气中的氧被电离, 以离子形式进入熔池; 二是电弧或预热的热量使焊接前方的母材和坡口处被提前氧化, 氧化皮在焊接时被电弧重新熔化进入熔池. 目前常用的抑制热裂纹的方法, 是通过在焊丝中添加脱氧元素, 以抑制氧的侵入造成的晶界的弱化. 目前, 使用 TIG 焊接紫铜厚板用的焊丝主要有铜镍 B30, HS201、铝青铜焊丝等. HS201 焊丝含有 Mn, Si 等

元素, 可以用于去除紫铜中本身的杂质, 并脱掉焊缝中的氧. 然而在实际工程焊接中, 使用 HS201 焊丝, 并不能完全消除热裂纹, 紫铜的热裂纹倾向仍然很严重, 目前仍不能确定造成热裂纹的主要原因.

文中选择 HS201 焊丝, 使用氦气保护的 TIG 焊接工艺, 焊接紫铜厚板, 研究了产生热裂纹的主要原因. 通过刚性拘束裂纹试验, 评定了在空气中, 以及在充满氦气的密闭环境中, TIG 焊接工艺的热裂纹敏感性. 通过真空高温拉伸试验, 对比了 HS201 焊丝, 以及 HS201 焊丝在紫铜表面堆焊后的熔敷金属的高温延性.

1 试验方法

试验母材为 T3 紫铜, 其化学成分如表 1 所示. 母材尺寸为 200 mm×100 mm×10 mm. 母材加工成 Y 形坡口, 坡口角 60°, 钝边 5 mm, 间隙 2 mm. 焊丝选用 HS201 成分如表 2 所示.

表 1 T₃ 紫铜的化学成分 (质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of T3 copper

Cu	O	Pb	S	Bi
99.70	0.1	0.01	0.01	0.002

焊接过程是在自制 650 mm×600 mm×450 mm 的氦气仓内进行的, 如图 1 所示, 这是一个完全隔离空气中氧的环境.

表 2 HS201 焊丝的化学成分 (质量分数, %)

Table 2 Chemical composition of HS201 filler

Si	Sn	Mn	Cu	熔点/ $^{\circ}\text{C}$
0.3	1.0	0.3	余量	1 050



图 1 自制氩气仓实物图

Fig. 1 Photograph of a cabin filled with Ar gas

2 试验方法及结果

2.1 空气中刚性拘束裂纹试验

选择刚性拘束裂纹试验, 评定在空气中使用氩气保护的 TIG 焊接紫铜厚板的热裂纹敏感性. 用 Cu-Ni30 焊丝将两块 T3 紫铜厚板四周固定在 $800\text{ mm}\times 800\text{ mm}\times 40\text{ mm}$ 的钢板上, 坡口间隙预留 2 mm . 待工件冷却至室温, 使用 HS201 焊丝, 在氩气随焊保护下 TIG 焊接紫铜板. 焊接电流 220 A , 氩气保护气流量为 10 L/min . 焊前不预热, 整个焊接过程在空气中进行. 图 2 为刚性拘束裂纹试验示意图.

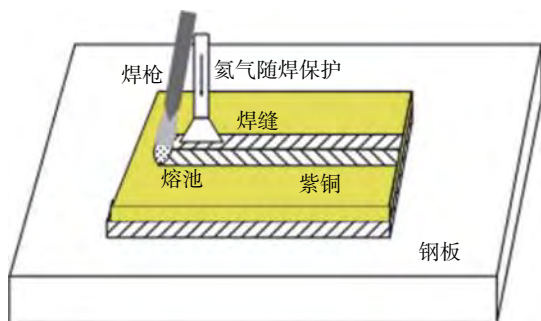


图 2 刚性拘束裂纹试验示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the rigid restraint cracking test

使用 HS201 焊丝在空气中氩气保护 TIG 焊接紫铜时的焊缝表面形貌, 可以看出在氩气保护下焊缝的成形较好. 但宏观的表面裂纹明显, 裂纹沿焊缝中心扩展, 几乎贯穿整条焊缝. 宏观接头形貌如图 3, 裂纹率测试结果如表 3 所示.



图 3 紫铜板在空气中焊接焊缝宏观形貌

Fig. 3 Macro morphology of the joint welded in air

表 3 空气中 TIG 焊接紫铜裂纹率 (质量分数, %)

Table 3 Rate of hot cracking after welding in the air

表面裂纹率 $C_f(\%)$	根部裂纹率 $C_r(\%)$	断面裂纹率 $C_s(\%)$
91.25	97.5	100

图 4 为金相显微镜下热裂纹的宏观形貌. 可以看到, 宏观裂纹边缘并不规则. 如图 5 所示, 在焊缝的中心处宏观裂纹的附近还能发现有若干不连续分布的微裂纹存在, 长度大约在 $50\sim 150\text{ }\mu\text{m}$, 且微裂纹的方向大多与竖直方向呈一定角度指向焊缝中心.

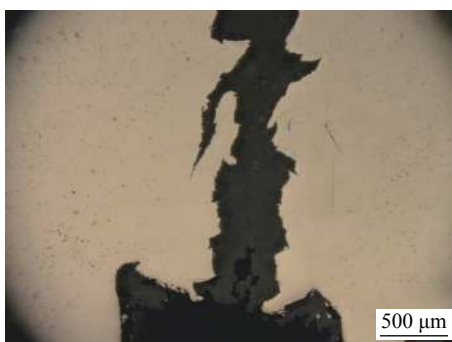


图 4 热裂纹的宏观形貌

Fig. 4 Macro morphology of the hot cracking

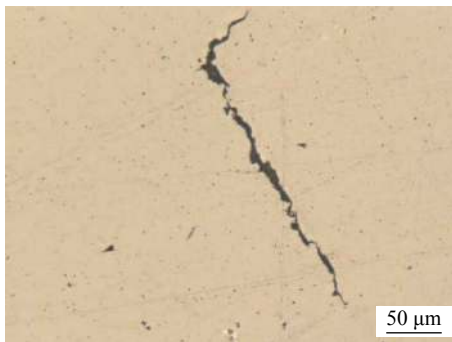


图 5 微观裂纹

Fig. 5 Microcrack

图 6 是裂纹晶经 FeCl_3 与盐酸的水溶液腐蚀后的金相组织. 从图中可以清晰看到宏观裂纹出现在柱状晶交汇的焊缝中心的晶界处, 微裂纹出现在指

向焊缝中心的柱状晶之间的晶界处, 裂纹的方向与柱状晶的生长方向一致。

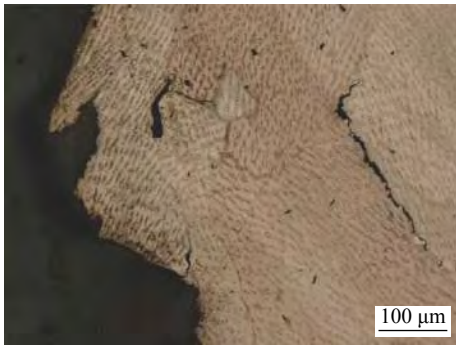


图 6 腐蚀后热裂纹的金相组织形貌

Fig. 6 Metallograph of the hot cracking after corrosion

图 7 为热裂纹尖端在 SEM 下的微观形貌。在裂纹尖端附近可以看到网格状的组织。表 4 是图 7 中不同区域的能谱结果。网格状组织 B 处铜和氧的原子数量比为 3:1; 可知网格状组织为 Cu_2O 和 Cu 元素的低熔共晶。从图中看出裂纹尖端处的网格状组织有撕裂痕迹, 说明共晶组织是在凝固时撕裂的。由于共晶组织的出现, 使得裂纹两侧的 $\alpha\text{-Cu}$ 建立了联系, 并且暂时阻碍了裂纹的扩展。当焊缝继续冷却, 两侧 $\alpha\text{-Cu}$ 受到更大的拉伸应力时, 而共晶组织变形抗拉能力较 $\alpha\text{-Cu}$ 差, 共晶组织就被应力撕裂, 裂纹继续沿共晶组织扩展, 并在不远处止裂。

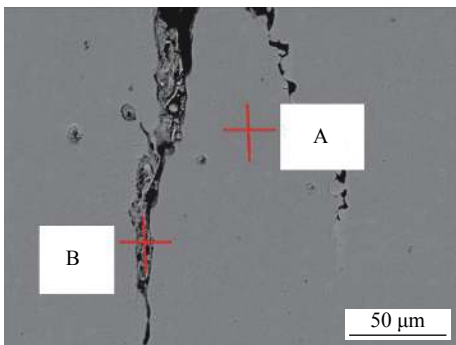


图 7 热裂纹微观形貌

Fig. 7 Microstructure of the hot cracking

表 4 点 A, B 处的能谱

Table 4 EDX results of regions A and B

位置	原子分数 $a_i(\%)$		质量分数 $w(\%)$	
	O元素	Cu元素	O元素	Cu元素
A	0	100	0	100
B	28.04	71.95	8.89	91.11

图 8 为断口上部靠近表面的区域的宏观形貌, 图中可以看到断口表面有很多小块和小球状的晶

粒, 同时长条状晶体的生长方向是斜向上的, 这与焊接方向有关, 晶粒朝着后凝固的方向生长。此处的开裂并没有破坏原有晶粒的生长, 说明此处结晶较晚是许多柱状晶树枝晶交汇的地方。

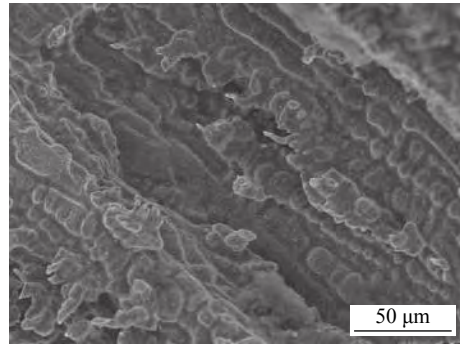


图 8 断口靠近表面区域的微观形貌

Fig. 8 Morphology of the fracture near the surfaces of the joint welded in air

图 9 所示是断口表面区域的微观形貌, 在自由结晶的表面有许多细小的二次裂纹。表 5 是图 9 断口不同区域的能谱结果。在二次裂纹的尖端 A 点测得有大量的 O 元素存在, 说明此处有 Cu 元素与 Cu_2O 的低熔共晶。在照片 C 的暗色物质为基本未被氧化的铜; 亮白色的有一定形状和角度的物质 B 经分析为表面附有 Cu 元素和 Cu_2O 低熔共晶的铜。

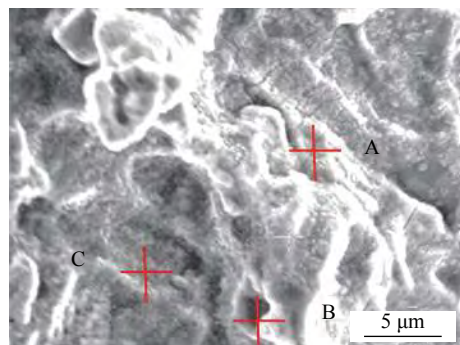


图 9 二次裂纹微观形貌

Fig. 9 Magnified micrograph of the secondary cracks

表 5 点 A, B, C 处的能谱

Table 5 EDX results of regions A, B and C

位置	原子分数 $a_i(\%)$			质量分数 $w(\%)$		
	O元素	Cu元素	Mn元素	O元素	Cu元素	Mn元素
A	26.38	73.62	-	8.28	91.72	-
B	12.78	86.17	1.05	3.57	95.43	1
C	1.64	98.35	-	0.42	99.58	-

2.2 氩气仓的使用及焊接保护效果

为了验证在氩气仓中焊接的保护效果,开 V 形坡口的 200 mm×100 mm×10 mm 的紫铜厚板,在氩气仓中使用 HS201 焊丝焊接.图 10 所示是焊缝的外观.在焊缝中心处取 $\phi 5 \times 6$ mm 的小圆棒,用立可公司生产的 RO-316 定氧仪进行分析测试,测试前应先使用砂纸打磨表面,并用丙酮清洗表面污渍.试验结果测得在氩气仓中氩气保护焊接得到的焊缝含氧量为 0.009 8%.



图 10 氩气保护下, TIG 焊接紫铜板的焊缝外观

Fig. 10 Macroscopic image of the copper joint TIG welded in the Ar atmosphere

图 11 为在铜板上不填丝进行熔凝试验后,母材表面外观形貌,熔凝后的母材表面光亮,保持金属原有颜色.而图 10 焊缝和铜板表面被灰黑色的物质覆盖.这是由于焊丝中有易挥发物质,在焊接时高温挥发在焊缝表面和铜板上.证明氩气仓保护良好,在氩气仓中焊接可达到排除空气中的氧的效果.

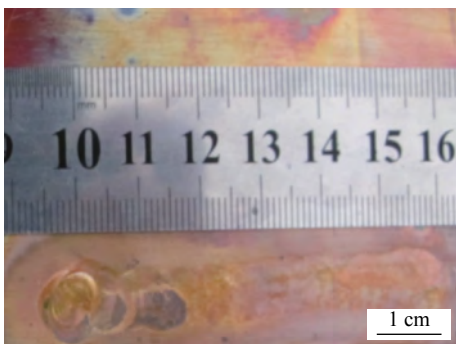


图 11 铜板熔凝试验后表面外观

Fig. 11 Appearance of fused copper in the Ar atmosphere

2.3 氩气保护下进行刚性拘束裂纹试验

试验在氩气仓中进行,以达到隔绝空气的效果.选用刚性拘束裂纹试验评定裂纹倾向,焊接条件、材料与在空气中氩气保护焊接紫铜厚板保持一

致,使用 HS201 焊丝,氩气随焊保护,气流量为 10 L/min,焊接电流 220 A.值得注意的是,将铜板固定在钢板上后应再次清理试件的坡口和铜板表面,避免在组装焊时,铜板表面吸附的氧带到氩气仓中.此外,整个焊接过程持续通入氩气,气流量 10 L/min,待铜板冷却后停止通气.

图 12 是氩气仓中氩气保护 TIG 焊接紫铜的焊缝表面形貌.在收弧处有约 1 cm 长的弧坑裂纹,但与在空气中焊接的焊缝外观不同,该裂纹并未贯穿整条焊缝.焊缝的其它区域成形良好,无裂纹产生.

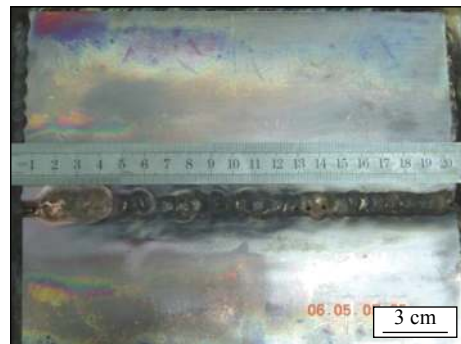


图 12 宏观接头形貌

Fig. 12 macrograph of the joint

沿垂直于焊缝长度的方向将试件切下,取 10 个试样做金相组织及裂纹率分析,接头的宏观形貌图 13 所示.表 6 是接头裂纹率的测试结果.

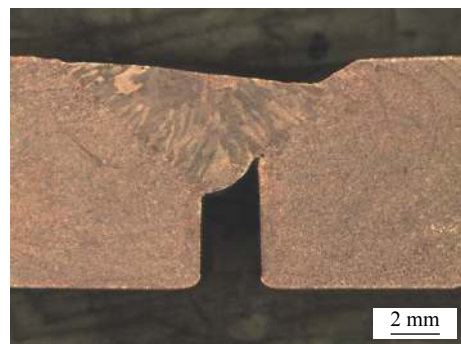


图 13 接头宏观形貌

Fig. 13 Macrograph of a section of the joint

表 6 氩气仓中紫铜焊接裂纹率 (%)

Table 6 Rate of hot cracking after welding in the Ar protection

表面裂纹率 C_f (%)	根部裂纹率 C_r (%)	断面裂纹率 C_s (%)
4.32	0	0

2.4 脆性温度区间和高温延性的分析

用差热分析对 HS201 焊丝的固液相线温度进

行了测定,测得它的固液温度区间为 1 020~1 080 ℃. 将固相线的温度-50 ℃ 作为起始测温点开始测量. 表 7 为 HS201 焊丝的高温延性的数据. HS201 焊丝的脆性温度区间为 970~1 025 ℃, 最小延性为 0.2%, 出现温度在 1 010 ℃.

表 7 HS201 焊丝的高温延性数据信息

Table 7 the data of the ductility of HS201 filler metal

温度 $T/^\circ\text{C}$	延性 $\varepsilon(\%)$	温度 $T/^\circ\text{C}$	延性 $\varepsilon(\%)$
950	32.6	1 005	0.5
960	11.6	1 010	0.2
970	2.45	1 020	2.2
990	1.25	1 025	1.75
1 000	1.6		

用 HS201 焊丝堆焊在紫铜板表面,取熔敷金属,近似的认为熔敷金属与焊缝金属成分相同. 表 8 为 HS201 焊丝熔敷金属的高温延性数据. 熔敷金属的脆性温度区间为 1 000~1 070 ℃, 最小延性出现在 1 058 ℃, 为 0.261%. 由于整个高温拉伸的过程是在高纯氧气保护条件下进行,因此 HS201 焊丝中没有 Cu_2O 和 Cu 元素的低熔共晶,而 HS201 堆焊的熔敷金属中,由于氧的侵入,有低熔共晶生成. 通过比较 HS201 焊丝和 HS201 的熔敷金属的高温性能可知,熔敷金属的最小延性和 HS201 焊丝的最小延性差距不明显,只是脆性温度区间的范围有所变化,这是由于焊丝中的铜与熔敷金属中的铜的含量不同导致的.

表 8 HS201 焊丝熔敷金属的高温延性数据信息

Table 8 Data of the ductility of HS201 deposited metal

温度 $T/^\circ\text{C}$	延性 $\varepsilon(\%)$	温度 $T/^\circ\text{C}$	延性 $\varepsilon(\%)$
900	7.68	1 047	0.39
950	5.43	1 058	0.261
1 000	0.95	1 066	0.37
1 010	0.75	1 070	0.41
1 020	0.51		

HS201 焊丝与熔敷金属的延性均较差,但是在隔绝氧的条件下(在氩气仓中),采用 HS201 焊丝焊接紫铜板,可以有效抑制热裂纹的产生. 由此可得出结论, TIG 焊接紫铜厚板,氧的侵入是造成热裂纹的主要原因.

3 结 论

(1) 在空气中使用 HS201 焊丝,氦气保护的 TIG 不预热焊接紫铜厚板的热裂纹倾向很大,导致热裂纹的原因是 HS201 焊丝脱氧能力不足,氧侵入焊缝形成 Cu_2O 和 Cu 元素的低熔共晶,在一次结晶的柱状晶晶界处偏聚. 低熔共晶在应力下开裂.

(2) 在氩气仓中使用 HS201 焊丝,氦气保护的 TIG 不预热焊接紫铜厚板的热裂纹倾向极小.

(3) HS201 焊丝的高温延性较差,与 HS201 焊丝熔敷金属的高温延性相比,由于铜含量不同,二者脆性温度区间不同,但是最小延性差距不明显.

(4) 通过对比在空气中和隔绝空气的氩气仓中, TIG 焊接紫铜板热裂纹倾向差异,以及 HS201 焊丝的高温延性,可知焊接过程中氧的侵入,是引起热裂纹的主要原因.

参考文献:

- [1] 郁雯霞. 不预热紫铜 TIG 焊接的工艺研究[J]. 机械工程师, 2008, 11(11): 128 - 130.
Yu Wenxia. The technology research of tig welding for red copper without preheating[J]. Mechanical Engineer, 2008, 11(11): 128 - 130.
- [2] 李一楠, 闫久春, 郭峰, 等. 紫铜厚大结构件钨极氩弧焊热裂纹形成机理[J]. 焊接学报, 2014, 35(8): 43 - 47.
Li Yinan, Yan Jiuchun, Guo Feng, et al. Formation process of hot cracking in copper He shielding gas tungsten welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(8): 43 - 47.
- [3] Anik S, Dorn L. Metallophysical processes in the welding of copper and copper alloys - welding methods[J]. Welding and Cutting, 1988, 9: 139 - 143.
- [4] Moarrefzadeh A, Sadeghi M A. Numerical simulation of copper temperature field in gas tungsten arc welding (GTAW) process[J]. Journal of Polymer Science, 2010, 7(6): 605 - 634.
- [5] 闫久春, 崔西会, 李庆芬, 等. 预热对紫铜厚板 TIG 焊接工艺性的影响[J]. 焊接, 2005(9): 58 - 61.
Yan Jiuchun, Cui Xihui, Li Qingfen, et al. Effects of preheating on gas tungsten arc welding of thick copper plate[J]. Welding & Joining, 2005(9): 58 - 61.
- [6] 刘会杰. 焊接冶金与焊接性[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [7] 李一楠. 紫铜厚板 GTAW 热裂纹形成机理及抑制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.

作者简介: 于汉臣,男,1980 年出生,本科,工程师. 主要从事超声复合焊接的研究. 取得国家专利 20 余项. Email: yhc@hit.edu.cn

strength. However, the obvious anisotropy of grain, which resulted in the uneven deformation of grain in different directions and restrained mutually during the tensile test, and the inevitable remarkable internal stress at the interface of fusion lines led to a decrease in elongation.

Key words: selective laser melting; stainless steel; microstructure; tensile properties

Mechanical properties and microstructures of laser coaxially assisted friction stir welded 2219-T6 aluminum alloy ZHANG Jing, FENG Xiaosong, XU Hui, GAO Jiashuang (Shanghai Aerospace Equipments Manufacturer, Shanghai 200245, China). pp 82-86

Abstract: Laser coaxially assisted friction stir welding process of 2219-T6 aluminum alloy was investigated, concentrating on weld appearance, mechanical properties and microstructure characteristics of the joints. The results show that assisted laser heat can effectively prevent tunnel defect, thus improving joint performance. However, high laser power increases softening of the welded zone and decreases joint performance. Assisted laser heat enlarges the nugget zone (NZ) and increases the size of θ phase (Al_2Cu), but has no obvious effect on microstructures of thermo-mechanically affected zone (TMAZ). T6 heat treatment of the welded joints can obviously increase the joint strength (from 76% of base metal to 100%). The grain sizes in NZ and TMAZ of joints with assisted laser heat are smaller than those without assisted laser after heat treatment.

Key words: laser assisted friction stir welding; mechanical properties; microstructure; heat treatment

Investigation on the cause of the hot cracking in GTA welding of thick copper plates YU Hanchen¹, YAN Han², LUAN Tianmin¹, FAN Wei¹, ZHANG Huiwen³ (1. State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 3. Harbin Welding Institute Limited Company, Harbin 150028, China). pp 87-91

Abstract: Hot cracking has become one of the main problems in GTA welding of thick copper plates. To find the dominant factors influencing the hot cracking, the hot cracking tendency of thick copper plate GTA welding with HS201 wire was investigated. The sensitivity was evaluated by the rigid restraint cracking test in air and an argon atmosphere. Combined with the test results of the high temperature ductility of the HS201 filler metal and deposited metal. The main cause and the corresponding inhibition measure of the hot cracks were revealed. Results indicate that, the main cause of the hot cracks were due to the poor deoxidizing capacity of the HS201 wire. Oxygen invaded the weld pool, forming low melting eutectic of Cu_2O and Cu. The eutectic segregated at the crystalline columnar crystal boundary, which cracked under stress.

Key words: copper; hot cracking; GTA welding

Effects of filler wire on microstructure and mechanical properties for fiber laser welding 6A02 aluminum alloy XU Fei, CHEN Li, GUO Luyun (Science and Technology on

Power Beam Processes Laboratory, AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China). pp 92-96

Abstract: 6A02 aluminum alloy with 1.0 mm thickness was welded by fiber laser beam. And the ER4043 filler wire was also used during the welding course. The effects of filler wire on cross-section of welds and characteristics of joints (including microstructure, microhardness and tensile properties) were analyzed. The results show that the welded seam by laser welding with filler wire (LFW) is very full. It also could increase the maximum assembly gap tolerance obviously. The microstructures of joint by LFW, either the columnar structures near the fusion zone or the mixed microstructures (including columnar grains and equiaxed grains) in the weld center zone, are coarser than that by autogenous laser welding. The softening phenomenon of the former is more serious than that of the latter. The tensile strength in welded state of the former is basically equal to that of the latter, which could reach to 83.2% of the base metal level. However, the strength could be recovered by solution and ageing heat treatment, and higher than the base metal level. The joint elongation by LFW is improved obviously and reaches to 21.29%, which is larger than 8.13% of that by autogenous laser welding.

Key words: 6A02 aluminum alloy; laser welding with filler wire (LFW); autogenous laser welding; microstructure; tensile properties

Temperature control method of hot bar bonder based on dynamic compensation for thermocouple ZENG Jiaquan¹, CAO Biao¹, YANG Kai² (1. School of Mechanical & Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Guangzhou Jingyuan Electrical Equipment Co., Ltd., Guangzhou 510663, China). pp 97-101

Abstract: A temperature control method for hot bar bonder was proposed to avoid temperature overshoot, improve stability of temperature control and achieve smooth temperature curves. Time constant of thermocouple was identified based on dynamic response characteristics of thermocouple and its identification value can be adjusted during the welding process. The output signal of thermocouple was compensated in real time using dynamic compensation technology for thermocouple, so that the actual temperature of the heater tip can be estimated and the compensation value was used in feedback control. Tests on the temperature control system showed that, compared with conventional PID algorithm, the temperature curve obtained with the proposed method was smooth with fast heating up speed and temperature overshoot was suppressed effectively with satisfied temperature control.

Key words: hot bar bonder; temperature control; parameter identification; dynamic compensation for thermocouple

Properties of Cr13 steel joints welded by nickel-based and austenite welding materials ZHANG Yazhi¹, ZHANG Guodong², YANG Hui², WANG Qiyu² (1. CRRC Zhuzhou Electric Co., Ltd, Zhuzhou 412000, China; 2. School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China). pp 102-107

Abstract: ER309L Austenitic welding materials and