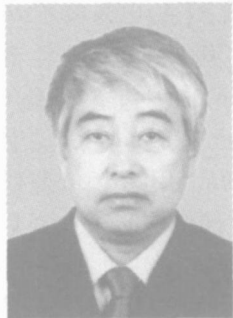


T91钢 TG+MG焊接接头性能及组织

常铁军¹, 龚正春², 李子峰¹, 王长柏¹

(1 哈尔滨工程大学 机电学院, 哈尔滨 150001; 2 哈尔滨
锅炉厂有限责任公司, 哈尔滨 150046)



常铁军

摘 要: 对采用 TG+MG 焊的 T91 钢焊接接头进行了力学性能、持久强度和高温时效试验, 并对 T91 钢 TG+MG 焊接接头的显微组织及断口的断裂特征进行了观察和分析。结果表明, T91 钢 TG+MG 焊接接头的韧脆转变温度 (FATT) 为 -13°C , 625°C 17958 h 高温持久试验为 70 MPa 外推 10^5 h 高温持久强度为 46.48 MPa。焊接接头的高温性能取决于其组织的变化, 以 M_{23}C_6 为主的合金碳化物对持久强度起了重要作用。

关键词: T91 钢; 韧脆转变温度; 显微组织; 持久强度

中图分类号: TG401 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2005)12-59-04

0 序 言

改进型 9Cr1Mo 钢是美国橡树岭国家实验室 (ORNL) 和美国燃烧工程公司 (CE) 于 1976 年共同研究开发的综合性能优良的动力工程锅炉用耐热钢。在随后的 1977~1984 年间, 橡树岭国家实验室、燃烧工程公司、法国 Vallourec 公司先后分别或联合对改进型 9Cr1Mo 钢进行了大量试验研究。因此 1983 年 ASTM 将改进型 9Cr1Mo 钢列入 SA213 标准, 钢号为 T91; 1984 年 ASME 将其列入 SA335 标准, 钢号为 P91, 并规定 T91 和 P91 钢可用于动力锅炉的压力管道及集气管^[1,2]。

20 世纪 90 年代初国内开始研制和生产 T91 钢管, 并列入国家标准 GB 5310-1995《高压锅炉用无缝钢管》, 钢号为 10Cr1MoVNb^[3]。T91 钢系马氏体耐热钢, 焊接性较差, 焊接中要重点防止冷裂纹及根部合金元素氧化过烧; 另一方面它有良好的塑性和韧性, 对焊接有利。T91 钢对冷裂纹有组织上的

敏感性, 在焊后的马氏体转变中, 氢以过饱和状态残留于马氏体内, 促使该区域进一步脆化, 由于焊后发生马氏体转变, 使接头处的组织应力增大。如果焊接热输入较大, 会造成层间过热, 出现粗大晶粒和网状晶界, 在晶界处产生微裂纹源; 若焊后去应力回火不及时, 裂纹将扩展, 造成冲击韧性下降。因此, 对该钢种施焊时, 采用合理的气体保护方法及预热、热处理规范是非常重要的。由此可见, 焊接工艺及焊接性能的研究在 T91 钢国产化的研究和应用中是最关键的课题之一。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

试验材料为上海宝山钢铁股份有限公司生产的 T91 钢管, 规格为 $\phi 60.3\text{ mm} \times 8\text{ mm}$, 供货状态为 1050°C 正火/ 790°C 回火。其化学成分见表 1。表 2 列出了 TG+MG 焊采用的 MGS-9Cb 焊丝的化学成分。

表 1 T91 钢管的化学成分 (质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of T91 steel tube

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Ni	Al	Nb	N
0.093	0.32	0.49	0.018	0.003	9.00	0.90	0.19	0.19	0.01	0.098	0.019

表 2 MGS-9Cb 焊丝化学成分 (质量分数, %)

Table 2 Chemical composition of MGS 9Cb wire metal

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Ni	Nb
0.07	0.39	1.61	0.015	0.009	9.18	0.92	0.25	0.49	0.028

1.2 试验方法

高温持久试样是施焊后按国家标准 GB 6395-86

要求加工成 $a=3\ 0\text{mm}$ 的板状试样; 高温时效试样是 T91 钢管纵向截取条形样, 施焊后精加工成 $15\text{mm}\times 280\text{mm}$ (厚度取管壁厚度) 的高温时效试样。

自动焊采用 TG+MG 焊, TG 焊预热电流 120 A, 焊接电流 140~150 A, 转速 3 r/min。MG 焊采用日本神戸钢厂的 $\phi 0\ 8\text{mm}$ 的 MGS-9cb 焊丝, 焊接电流 97 A, 电弧电压 24 V; 一层焊速 7 r/min 摆动频率 30 C/min 送丝速度 6 m/min; 二层焊速 4 r/min 摆动频率 20 C/min 送丝速度 6 m/min; 三层焊速 3 r/min 摆动频率 25 C/min 送丝速度 6 m/min。用 2515X 型射线机对焊接接头进行 TV 光 RT 探伤拍照来检查焊缝的质量, 焊缝合格的试样用 H15 型热处理炉进行 $760\text{ }^{\circ}\text{C}/0\ 5\text{ h}$ 空冷的消除应力热处理。持久试验用 RD₂-3 型高温及持久强度试验机进行。用 WG3-1050 型试验电炉进行时效试验。

冲击试样为夏比 V 型试样, 尺寸为 $5\text{mm}\times 10\text{mm}\times 55\text{mm}$, 沿 T91 钢管取纵向试样。利用 JB30B 型冲击试验机进行不同温度下的冲击试验, 三个试样为一组, 测定冲击吸收功随试验温度的变化, 取其算术平均值, 做出韧脆转变曲线; 并依照国家标准 GB/T12778-91 有关金属夏比冲击断口的测定方法, 采用英国 MAGISCAN-II A 型图像分析仪, 来测定冲击断口的韧性区面积百分比。利用超声波仪清洗后, 在 S-240 型扫描电镜下观察断口的断裂特征。用 Olympus 金相显微镜进行金相组织观察, 组织显示采用 4% 硝酸酒精, 反复进行浸蚀与观察, 直至金相试样显出清晰的组织图像。透射电镜试样采用 MTP-1A 型双喷电子减薄仪减薄, 在 PHILIPS CM12 型透射电镜下进行观察。

2 试验结果与分析

2.1 冲击试验

对 T91 钢的 TG+MG 焊接接头分别进行了 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冲击试验; 取脆性断口面积占 50% 的温度为韧脆转变温度, 将数据绘制成图 1, 可以看出 T91 钢焊接接头的韧脆转变温度 (FATT) 为 $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。扫描电镜观察可知 TG+MG 焊接接头由韧性断裂过渡为脆性断裂。相应地, 断口形式也由韧窝断口经过混合断口过渡为准解理断口。图 2 分别是室温、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的扫描电镜断口形貌。从图中可见, 在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 断口呈现明显韧窝状, $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时则呈现准解理断口。T91 钢母材的韧脆转变温度比 T91 钢的 TG+MG 焊接接头的韧脆转变温度低很多, 这是由于两种状态的马氏体结构和晶粒尺寸存在着很大的差异。T91 钢的 TG

+MG 焊接接头冲击试验表明: 焊缝的力学性能和断裂变化规律的深入研究对 T91 钢的应用具有重大的意义。

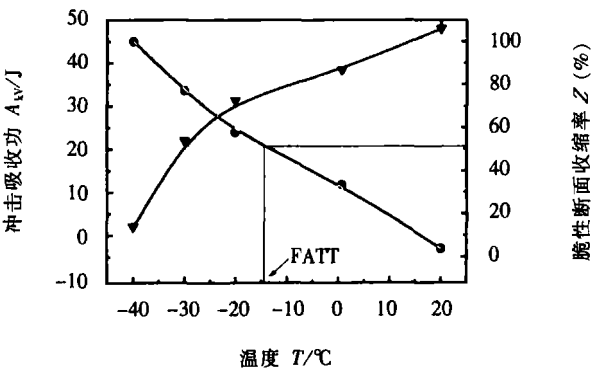


图 1 TG+MG 焊接接头的韧脆转变温度曲线
Fig. 1 FATT curve of TG+MG welded joint

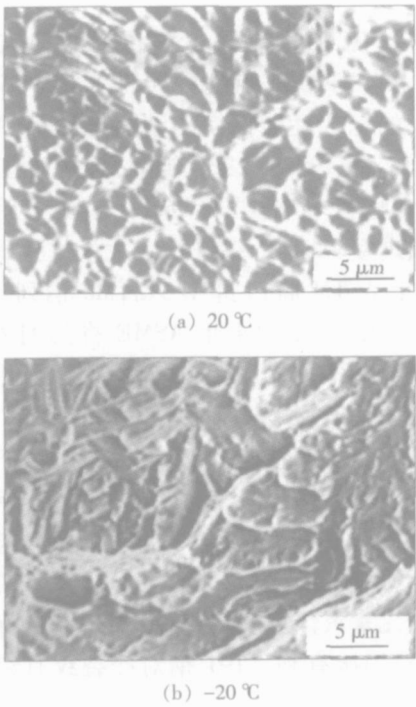


图 2 TG+MG 焊焊缝的 SEM 照片
Fig. 2 SEM photos of TG+MG welded seam

2.2 T91 钢的 TG+MG 焊接接头的高温性能

T91 钢 TG+MG 焊接接头的高温长期时效处理温度为 $625\text{ }^{\circ}\text{C}$, 保温时间分别是 1 000 h、3 000 h、5 000 h、10 000 h, 长期时效后的力学性能试验数据绘制成图 3。T91 钢 TG+MG 焊接接头的高温拉伸持久试验温度为 $625\text{ }^{\circ}\text{C}$, 最长试验时间为 17 958 h, 其抗拉强度为 70 MPa。加载应力与断裂时间绘制成图 4 对试验数据线性拟合, 拟合公式

为: $y=10^{2.22039}+x^{-0.11062}$, 利用公式外推 1×10^5 h 的抗拉强度值 $\sigma_{10}^5=46\ 48\text{MPa}$

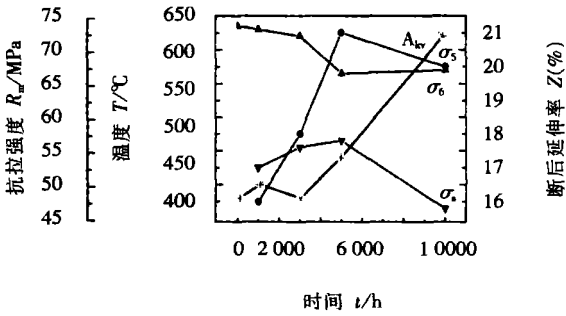


图 3 T91钢 TIG+MIG 焊接接头高温长期时效后的力学性能曲线

Fig 3 Mechanical properties of T91 steel at high temperature after long period age

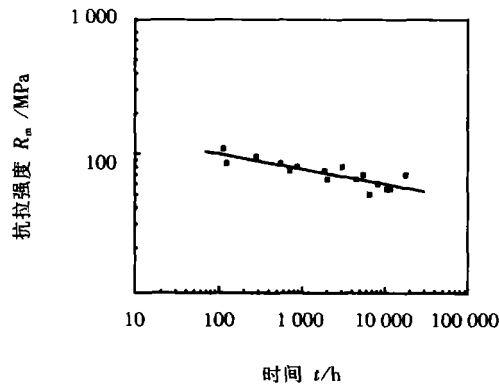


图 4 625℃时 T91 钢 TIG+MIG 焊接接头的抗拉强度曲线

Fig 4 Tensile strength values of TIG+MIG welded joint for T91 steel at 625 °C

2 3 显微组织分析

在光学显微镜下观察, 供货状态下 T91 钢母材的金相组织为回火马氏体, 马氏体为等轴状, 见图 5a TIG+MIG 焊缝的金相组织为典型的板条马氏体组织, 晶粒粗大, 见图 5b

在透射电镜下观察得到 T91 钢 TIG+MIG 焊缝高温时效前的回火马氏体组织, 马氏体板条粗大, 板条界处有弥散点状的碳化物析出, 板条内有大量的位错, 见图 6a 图 6b 是 TIG+MIG 焊缝高温时效 10 000 h 的晶界碳化物照片; 图 6c 是高温时效后的局部再结晶照片。由 TEM 观察可以看到, 经过 10 000 h 的时效试验后晶界及马氏体板条界处的碳化物明显增多, 且有长大的迹象 (图 6b); 局部发生了

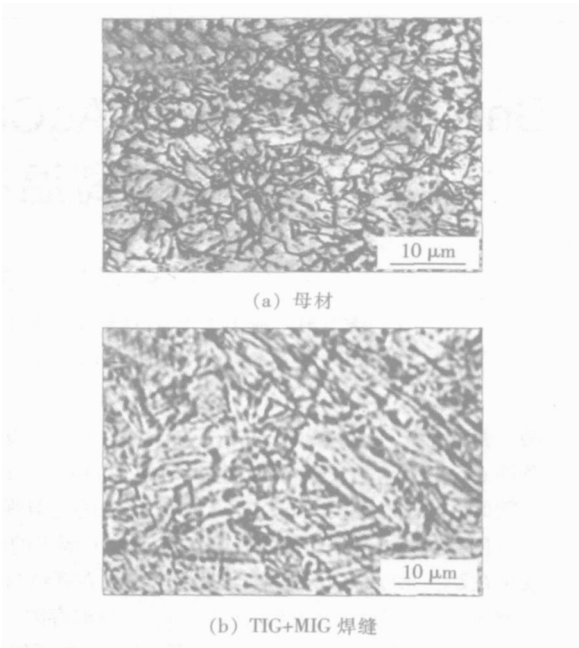


图 5 T91 钢金相组织

Fig 5 Microstructure of T91 steel

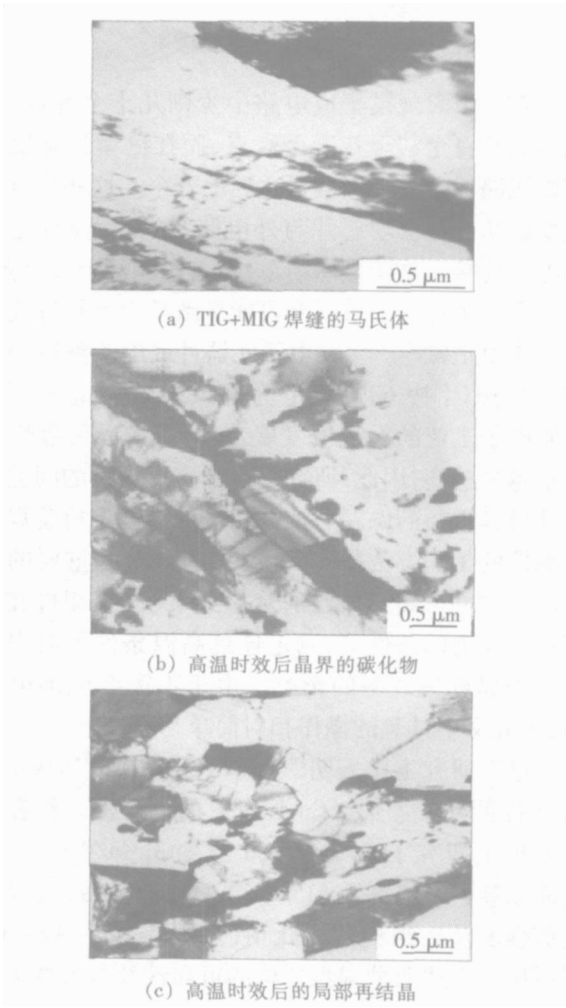


图 6 T91 钢 TEM 照片

Fig. 6 TEM photos of the T91 steel

[6] Hong B Z, Burrell L G. Modeling thermally induced viscoplastic deformation and low cycle fatigue of CBGA solder joint in a surface mount package[J]. IEEE Transactions on Components Hybrids and Manufacturing Technology 1997 20(3): 280 - 285

[7] 邵蕴秋. ANSYS 8.0 有限元分析[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004

[8] Lau J H, Harkins C G. Thermal stress analysis of SOT packages and interconnections[J]. IEEE Transactions on Components Hybrids and Manufacturing Technology 1988 11(4): 380 - 389.

[9] 杨 敏, 邹增大, 王春青, 等. 气孔缺陷位置对 SMT 焊点热疲劳寿命影响的数值分析[J]. 中国机械工程, 2003 14(8): 708 - 711.

[10] 耿照新, 杨玉萍. CBGA 组件热变形的 2D - Plane42 模型有限元分析[J]. 首都师范大学学报, 2003 24(2): 29 - 32

[11] Soper A, Pozzi G, Ignat M. Mechanical response of solder joints in flip chip type structures[J]. Microelectronics and Reliability 1997 37 1783 - 1786.

[12] Pei Lin Wu, Meng Kuang Huang, Chiapeng Lee et al. Failure behavior of small outline J Lead Sn - X (X = AgCu or Pb) solder joints under thermal mechanical fatigue test[J]. Materials Chemistry and Physics 2004 87 285 - 291.

作者简介: 吴玉秀, 女, 1982 年 1 月出生, 硕士研究生。主要从事微电子焊接及无铅焊料研究。

Email W yx640@163. com

[上接第 61 页]

回复与再结晶现象(图 6c)。图 7 是对碳化物的能谱分析结果,可以看出析出碳化物主要是 $M_{23}C_6$ 相。这些碳化物阻碍了晶界和位错的迁移,使得晶粒细化。

由图 3 图 4 可以看到:在高温条件下 T91 钢的 TG+MG 焊接接头的抗拉强度和持久强度下降的幅度是很小的。可见,碳化物的析出对 T91 钢的 TG+MG 焊接接头的高温性能具有很大的贡献。

T91 钢奥氏体化温度大约 1 050 ℃,形成全奥氏体组织的能力取决于奥氏体形成元素 Ni Mn Cu、Co C 和 N 与铁素体形成元素 Cr Si Mo W、V 和 Nb 恰当的平衡。T91 是在 T9 的基础上添加 V、N、Nb,并降低碳含量而得到的。Cr Mo 元素本身就是通过强化固溶体,提高再结晶温度来提高强度,现加入了 V、Nb 等元素形成的碳化物起到了沉淀强化的作用。同时, N 也是强化元素^[4]。 $M_{23}C_6$ 的热稳定性相当高,这种碳化物当回火时在晶界析出,通过阻碍晶粒长大来增加持久强度,通过增加 $M_{23}C_6$ 碳化物的量,使 600 ℃的持久强度大幅提高。

3 结 论

(1) 上海宝钢供应的 $\phi 60.3\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ T91 钢管供货态为回火马氏体,马氏体为等轴状,晶界上分布着 $M_{23}C_6$ 型碳化物,晶内有弥散的碳化物,并有大量位错。

(2) T91 钢的 TG+MG 焊接接头的冲击试验表明:焊缝的 FATT 为 -13 ℃,扫描电镜断口分析表明:该钢的 TG+MG 焊缝断口在 -40 ℃下 $S_{\text{脆}}/S_{\text{总}}$ 为 100%。

(3) T91 钢 TG+MG 焊接接头在 625 ℃经过长达 10 000 h 时效后,晶粒内碳化物有大量析出,位错密度降低,马氏体板条内出现亚晶粒,从而表现出好的热稳定性。

(4) T91 钢 TG+MG 焊接接头 625 ℃/17 958 h 高温拉伸持久强度为 70 MPa 外推 1×10^5 h 高温拉伸持久强度值 $\sigma_{10}^5=46.48\text{ MPa}$

参考文献:

[1] 朱丽慧, 赵钦新, 顾海澄, 等. 10CrMo1VNbN 耐热钢强化机理研究[J]. 机械工程材料, 1999 23(1): 6 - 8

[2] 赵麦群, 戴 熹, 葛利玲, 等. 10CrMo1VNbN 钢无应力时效的组织与性能研究[J]. 材料热处理学报, 2003 24(3): 12 - 16.

[3] 刘 宁, 舒先进, 乐敏毅, 等. P91 钢管的力学性能研究[J]. 钢管, 1997 26(6): 18 - 22

[4] 周丽萍, 韩跃文, 朱文健. P91 钢管性能试验[A]. 第 18 届全国锅炉用钢会论文集[C], 哈尔滨, 2000. 204 - 208

作者简介: 常铁军, 男, 1949 年出生, 教授。主要研究方向为舰船材料、纳米材料。发表论文 30 余篇。

Email changtiejun@hubeu. edu. cn

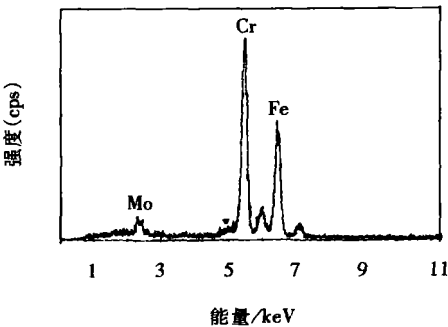


图 7 T91 钢 TG+MG 焊缝碳化物能谱分析

Fig 7 Energy spectrum analysis result of carbide for T91 TG+MG weld metal

Abstract According to the brazing techniques of large scale generators and high power transformers, a 20 kHz/40 kW superaudio frequency inverted welding power supply was designed. It used PSM (Pulse Symmetrical Modulated) power control inverter. The serial resonant full bridge inverter executes both power converting and power adjusting. The main switches of the inverter are controlled according to the PSM and the inverter always works at resonant with the same pace of the load and work in shutting off at ZCS and ZVS while switching on and off. The inverter is with unity power factor and raises efficiency.

Key words Welding; Inverter; ZCS; Exceed Audio Frequency Induction; Generator; Transformer

Mechanical properties and microstructure of TIG+MIG welded joint of T91 steel CHANG Tie-jun¹, GONG Zheng-chun², LI Zi-feng¹, WANG Chang-bai¹ (1. School of Mechanical and Electric Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. Harbin Boiler Company Ltd., Harbin 150046, China). p59-64, 88

Abstract The mechanical properties, creep strength and high temperature ageing of TIG+MIG welded joint of T91 steel were tested. Microstructure and fracture morphology of the joint was analyzed. The creep strength of 625 °C for 17 958 h is 70 MPa, which can deduce that the sustained strength after 10⁵ h is 46.5 MPa and the FATT is -13 °C. It is proved that the properties of TIG+MIG welding joint at high temperature is determined by the change of microstructure. Furthermore, M₂₃C₆ plays an important role.

Key words T91 steel; FATT; microstructure; sustained strength

Investigation for SnAgCu/Cu and SnAgCu/Au/Ni/Cu surface mounted soldered joints stored at high temperature XUE Song-bai¹, WANG Xu-yan¹, YU Sheng-lin² (1. College of Materials Science & Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. The 14th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210013, China). p62-64

Abstract Shear strength and fracture photographs of SnAgCu/Cu and SnAgCu/Au/Ni/Cu surface mounted soldered joints stored at high temperature were investigated. Results indicate that the shear strength of SnAgCu/Cu and SnAgCu/Au/Ni/Cu soldered joints decrease with high temperature storage time increasing, and the shear strength of SnAgCu/Cu soldered joint is larger than that of SnAgCu/Au/Ni/Cu soldered joint. Analysis for fracture photographs of SnAgCu/Cu and SnAgCu/Au/Ni/Cu soldered joints indicates that most of the fractures of SnAgCu/Cu and SnAgCu/Au/Ni/Cu soldered joints occurred in the metallic layer of surface mounted components' ends and minority fractures occurred in the solder/pad interface or in the solder.

Key words shear strength; SnAgCu solder; soldered joint; storage at high temperature

Simulation of the temperature field and flow field in full penetration laser welding DU Han-bin¹, HU Lun-jie², WANG Dong-cuan¹, SUN Cheng-zhi¹ (Automotive Engineering Academy of Shanghai Automotive Industry Co. (Group), Shanghai 200437, China; 2. School of Materials Sci. & Eng., Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China). p65-68, 100

Abstract A three-dimensional mathematical model for the temperature field and flow field in full penetration laser welding of titanium alloy was presented. In this model, the heat source comprises a plane heat source on the top surface and a cylindrical heat source along the z direction, which takes into account the plasma effect and the keyhole absorption. The mushy region is introduced to provide a simple method to dispose of the pressure and velocity boundary conditions. Calculated results from the models are found to agree with the experimental results for the geometry profile of weld. The metal flow is the main cause for forming the typical "hourglass" cross section profile.

Key words laser welding; temperature field; flow field; mathematical simulation

Influence of cerium on microstructure of Sn-Ag-Cu lead-free solder CHEN Yan¹, XUE Song-bai², LV Xiao-chun¹, LIAO Yong-ping¹ (1. Harbin Welding Institute, Harbin 150080, China; 2. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China). p69-72

Abstract The microstructures of Sn-3.8Ag-0.7Cu lead-free solder with different contents of cerium were studied. The studied results showed that the microstructures can be refined and the intermetallic compounds can be suppressed because of addition of small amounts of cerium into the lead-free solder. When cerium is 0.03wt%, the microstructure of the solder is fine and distributed uniformly, and which possess the best mechanical properties of soldered joints and better wettability. When cerium is over 0.03wt%, the black cerium-rich phase appears and increases with the content of cerium. The microstructure analyses and theoretical calculation indicated that the black cerium-rich phase is a compound of Sn and Ce.

Key words cerium; lead-free solder; microstructure

Tansient liquid phase bonding tungsten to copper alloy SHEN Yi-fu¹, LIU Shi-fu¹, LI Jun-we², XU Jie¹ (1. College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Jiangsu Nanjing 210016, China; 2. Xiamen Hongli Corporation, Fujian Xiamen 361021, China). p73-76