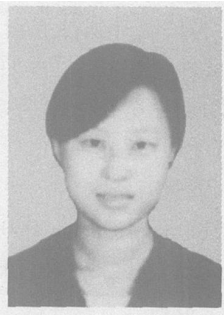


铝锂合金钎焊接头断口组织与性能

张 玲， 薛松柏， 师怀江， 吴玉秀
(南京航空航天大学 材料科学与技术学院 南京 210016)



张 玲

摘 要: 采用金相显微镜、扫描电镜、硬度计等测量方法, 观察分析了铝锂合金钎焊前后母材和钎焊接头的显微组织变化, 通过分析测试钎焊接头的显微硬度和断口微区的化学成分, 研究分析了钎焊接头强度的变化规律。结果表明, 焊后母材中的强化相由质点转变为板条状; 氮气保护条件下, 钎焊接头未见气孔、夹杂、裂纹等缺陷, 钎焊接头存在一定的扩散区, 从而有效地提高了钎焊接头的强度; 无氮气保护的条件下, 钎焊接头有大量的缺陷存在, 这些缺陷的存在严重影响了钎焊接头的强度。
关键词: 铝锂合金; 钎焊接头; 显微组织; 显微硬度
中图分类号: TG454 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2006)10-065-04

0 序 言

铝锂合金具有低密度、高比强度和高比刚度, 是航空航天工业较理想的结构材料^[1], 但是其焊接接头性能是影响铝锂合金能否广泛应用的关键因素之一。关于铝锂合金熔化焊的报道较多, 但熔化焊接头容易产生气孔、热影响区软化^[2]及接头强度系数较低等缺陷, 制约了铝锂合金的广泛应用。钎焊可以有效地避免上述缺陷, 而且焊接精度较高, 所以铝锂合金的钎焊越来越受到焊接工作者的关注, 但是由于其技术难度大, 国内外有关铝锂合金钎焊技术研究的报道甚少。因此, 研究铝锂合金的钎焊技术有着十分重要的意义。

作者采用 Ag-Al-Cu-Zn 钎料配合 CsF-AlF₃ 钎剂, 氮气保护条件下, 在炉中进行铝锂合金的钎焊, 在钎焊温度为 530 ℃、保温 3 min, 随炉冷至 450 ℃后, 再空冷至室温, 随后在室温下进行自然时效处理, 得到了平均抗拉强度为 385 MPa 的对接钎焊接头(接头的平均强度系数为 0.88)和平均

抗剪强度为 360 MPa 搭接钎焊接头(接头的强度系数为 0.82), 这是迄今为止见诸报道的最好的研究结果。

主要通过采用金相显微镜、扫描电镜、硬度计等设备, 观察分析了铝锂合金钎焊前后母材和钎焊接头断口的显微组织变化, 通过分析测试钎焊接头的显微硬度和断口微区的化学成分, 研究分析了钎焊接头显微组织与强度的变化及影响规律。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验选用的母材成分与 1460 铝锂合金成分接近(见表 1), 轧制后的试板厚度为 2.36 mm。钎剂选用 CsF-AlF₃ 钎剂, 为进一步提高 CsF-AlF₃ 钎剂的活性, 加入了微量活性成分, 其熔化温度为 460~480 ℃。钎料为 Ag-Al-Cu-Zn 钎料, 熔化温度为 455~485 ℃。母材和钎料的化学成分如表 1 所示。

表 1 铝锂合金和钎料的化学成分(质量分数, %)
Table 1 Chemical compositions of Al-Li alloy and filler metal

材 料	Li	Cu	Mg	Sc + Zr	Ag	Zn	Al
母 材	1.6	3.9	0.5	0.3	—	—	余量
1460 合金 ^[3]	2.0~2.4	2.6~3.3	0.05	Sc 0.05~0.14; Zr 0.08~0.13	Ti 0.01~0.05	—	余量
钎 料	—	12.2	—	—	24.0	39.9	余量

收稿日期: 2006-07-20
基金项目: 兰州理工大学, 甘肃省有色金属新材料省部共建国家重点实验室开放基金项目(K2005-04)

1.2 试验工艺
钎焊前对铝锂合金试板和钎料表面进行如下处

理:先用丙酮去除表面油污,再用 15%NaOH 溶液处理 15 s 左右。溶液温度为 50~60 ℃,然后用蒸馏水冲洗,再用 1:3 的稀硝酸溶液处理 10 s 左右,之后用蒸馏水冲洗,再用乙醇清洗,自然晾干备用。钎焊接头形式分为对接和搭接两种,搭接接头的搭接宽度为 3 mm,钎焊温度为 530 ℃,保温 3 min。具体钎焊步骤为:当炉温升到钎焊温度(530 ℃)后,把装配好的待焊试件放入炉中,再加温到 530 ℃后保温 3 min,之后随炉冷至 450 ℃后空冷至室温,随后在室温下进行自然时效处理。

1.3 试验方法

- (1) 采用 Quanta2000 型扫描电镜自带的能谱仪对经过抛光腐蚀后的母材、钎焊接头断口进行微区成分分析;
- (2) 采用 MM6 型光学金相显微镜观察钎焊前

后母材和钎焊接头断口的显微组织,所使用的腐蚀剂为 0.5%HF;

(3) 采用 HXS-1000A 显微硬度计测试钎焊接头的显微硬度,载荷为 0.49 N,保持时间 20 s。

2 试验结果与分析

2.1 能谱分析

铝锂合金属于可热处理强化铝合金。试验中采用铝锂合金的强化相主要有 $T_1(Al_2CuLi)$, $\delta'(Al_3Li)$, Al_3Zr , Al_3Sc 等相存在^[4,5]。图 1 是微区位置及钎焊接头扩散区成分分布图,图 1c 的 A 区对应接头界面扩散区。微区的元素含量及推断出的各微区的物相如表 2 所示。由于能谱分析无法得到 Li 元素的正确数值,所以在表中均未标出 Li 元素含量。

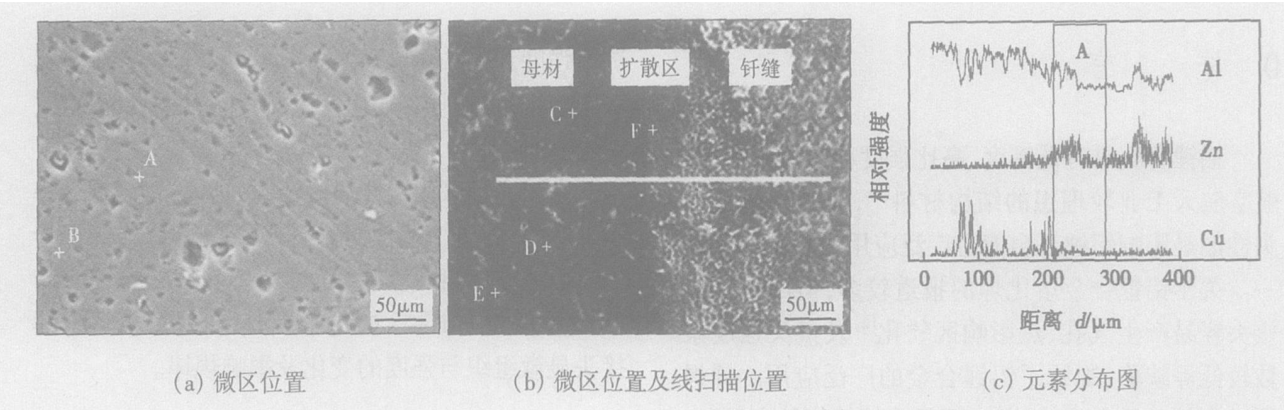


图 1 钎焊接头元素分布图

Fig. 1 Element distribution of brazed joint

表 2 各微区的化学成分(质量分数, %)

Table 2 Chemical compositions of points

序 号	Al	Cu	Mg	Zr	Sc	推断出微区主要相	分析部位
A	95.09	3.62	0.93	—	0.36	基体相	钎焊前母材
B	58.41	41.59	—	—	—	$T_1(Al_2CuLi)$	钎焊前母材
C	62.02	37.98	—	—	—	$T_1(Al_2CuLi)$	钎焊后母材
D	84.74	0.89	0.67	13.48	0.22	Al_3Zr	钎焊后母材
E	45.40	53.37	0.95	—	0.28	$T_1(Al_2CuLi)$	钎焊后母材
F	84.75	1.93	Ag 0.70	5.17	Zn 7.45	Al_3Zr	钎焊接头扩散区

铝锂合金在固溶淬火后形成过饱和固溶体,过饱和固溶体在随后的时效过程中在基体上沉淀析出弥散分布的强化相粒子,并通过沉淀强化使合金的强度提高,其中主要的强化相为 T_1 相。由于合金中添加了微量 Sc, Zr 元素,在均匀化退火和热轧变形

过程中会析出 Al_3Sc 和 $Al_3(Sc_{1-x}, Zr_x)$ 质点^[5,6],由于质点非常细小,呈均匀弥散分布,强烈地钉扎在位错和亚晶界,有效地阻止了亚晶的迁移合并,从而稳定了亚晶组织结构,并对合金的再结晶过程有强烈的阻碍作用。从表 2 中可以看出, F 处即含有母材中的 Zr 等元素,也含有钎料中的 Zn, Ag 元素,说明母

材和钎缝中的合金元素发生了扩散。

从图 1c 的区域 A 中可以看出,从母材到钎缝,Al 的含量逐渐减少,而 Zn 的含量逐渐增多,说明母材和钎缝中的合金元素之间发生了相互扩散,相互扩散过程的存在有助于提高钎焊接头的强度,而铜元素多是以化合物的形式存在的,见图 1c 中的 Cu 元素的分布曲线。

2.2 显微组织分析

图 2 是母材的金相显微组织,灰色的是 Al 基体相,黑色的为强化相。图 2a 是钎焊前母材的显微组织,图 2b 是钎焊后母材的显微组织,图 2c 是图 2a 中 A 区的放大图,图 2d 是图 2b 中 B 区的放大图。

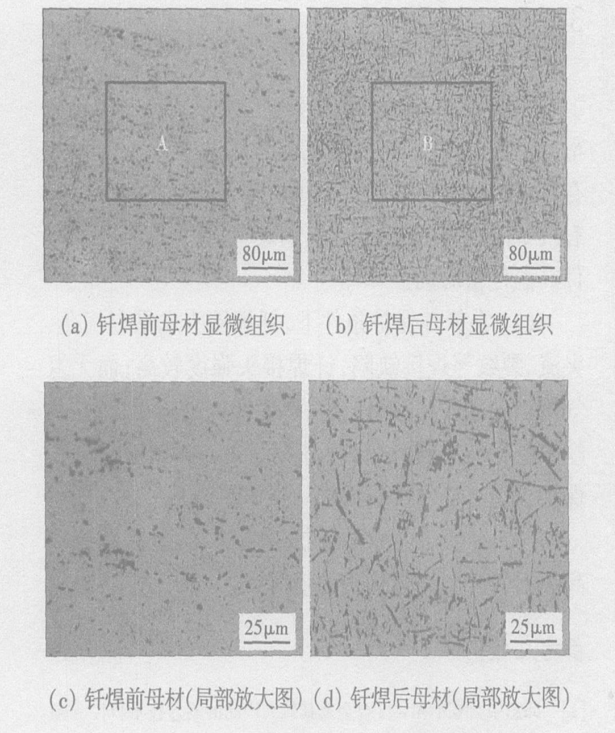


图 2 母材的显微组织
Fig. 2 Microstructures of base metal

从图 2a 中可以看出,钎焊前母材中的强化相以质点的形式存在,且质点颗粒细小,均匀弥散分布在基体上。从图 2b 中可以看出,钎焊后母材中的强化相以板条状的形式存在,尺寸增大。从图 2c,图 2d 局部放大图中可以更清楚地看出强化相的形状。强化相的存在形式决定着合金材料的力学性能,钎焊后母材中的强化相从质点的形式转变为板条状形式,强化相长大对位错运动的阻碍作用减弱,从而导致经过钎焊热循环后母材的强度有所下降。为了避免经过钎焊热循环后母材的强度下降过多,必须控制钎焊试件在高温的停留时间。

图 3 是钎焊接头的显微组织。图 3a 是氮气保护条件下钎焊接头的显微组织,从图中可以看出,钎焊接头没有气孔、夹杂、裂纹等缺陷存在,且母材与

钎缝之间结合良好。图 3b 是无氮气保护条件下钎焊接头的显微组织,从中可以看出,钎缝内部有大量的缺陷存在。这是因为在氮气保护条件下,CsF—AlF₃ 钎剂能够有效地去除铝锂合金表面的氧化膜,液态 Ag—Al—Cu—Zn 钎料能在铝锂合金表面顺利地铺展,且钎剂残渣能及时排出,因此避免了气孔、夹杂等焊接缺陷的形成,在钎焊热循环后续的降温过程中,母材和钎缝合金元素之间的相互扩散较为充分,钎焊接头形成了较为均匀的显微组织,使得钎焊接头具有较高的强度。

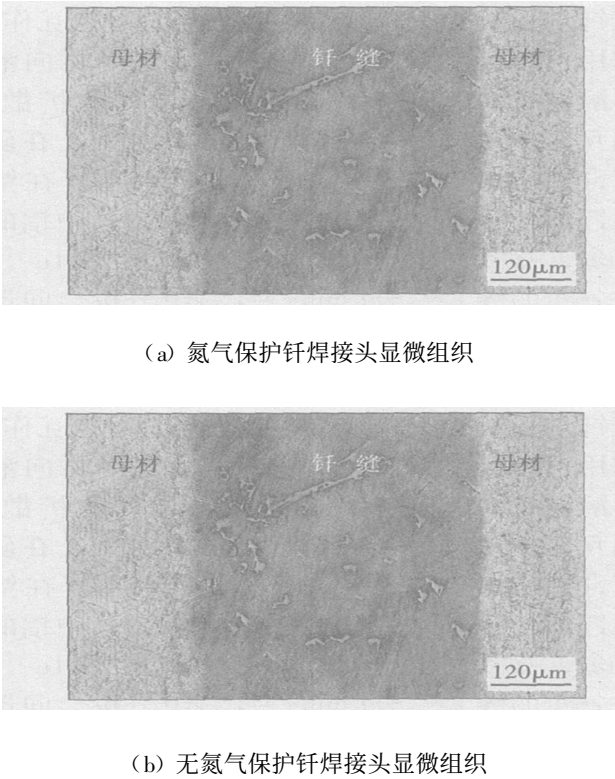


图 3 钎焊接头的显微组织
Fig. 3 Microstructures of brazed joints

在无氮气保护条件下,由于铝锂合金极易被氧化,CsF—AlF₃ 钎剂在去除氧化膜过程中,钎剂去膜不充分,不能很好地保证液态钎料的铺展。由于钎剂残渣不能及时排出,铝锂合金被二次氧化也可能产生氧化物,导致钎缝内部产生了许多缺陷,这些缺陷的存在,严重降低了钎焊接头的强度。因此,采用氮气保护是提高铝锂合金钎焊接头强度的重要手段之一。

图 4 是氮气保护条件下钎焊接头扩散区的显微组织。从图中可以看出,界面处未发现明显的缺陷,且母材与钎缝处没有明显的界线,说明母材与钎缝之间扩散充分,钎缝组织致密,因而具有较高的钎焊接头强度。

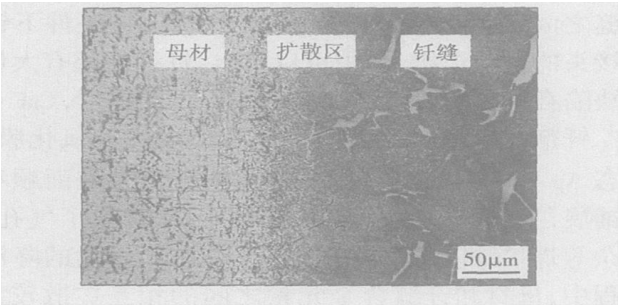


图 4 钎焊接头扩散区显微组织

Fig. 4 Microstructure of diffusion zone in brazed joint

在钎焊过程中, 液态钎料与母材发生相互作用, 这种作用可以归结为两类: 一类是固态母材向液态钎料的溶解; 另一类是液态钎料向母材的扩散^[7]。这些相互作用对钎焊接头的性能影响很大。在研究条件下, 这两类作用在钎焊过程中都存在。在铝锂合金的钎焊过程中, 采用铝基钎料时, 钎缝中铝的含量会增多, 说明母材会向钎料中溶解(见图 1c 中 Al 元素的分布曲线)。与此同时, 钎料组分也会向母材扩散, 见图 1c 中 Zn 元素的分布曲线。由于母材与钎料都有相同的金属基体 Al, 固态、液态都能产生固溶, 钎料液体层的结晶由母材金属的晶粒上开始, 在钎料的液体层中形成以铝合金为基础的晶内结合, 表现为冶金结合状态。冶金结合的界面及扩散区的存在, 可以有效地提高钎焊接头的强度。

2.3 钎焊接头的显微硬度

图 5 是钎焊接头显微硬度分布图。测定显微硬度时, 测量点的间距为 0.1 mm, 从母材测量到钎缝, 再到母材。

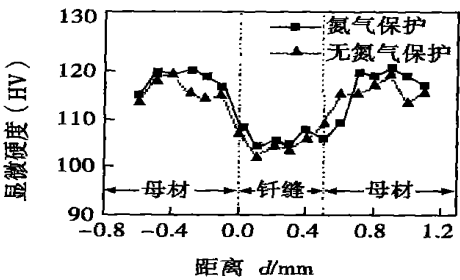


图 5 钎焊接头的显微硬度

Fig. 5 Microhardness of brazed joints

钎焊前母材的平均硬度值为 150 HV, 钎料的平均硬度值为 140 HV。从图 5 中可以看出, 在氮气保护条件下, 母材硬度的平均值约为 118 HV, 钎缝硬度的平均值为 106 HV; 无氮气保护条件下, 母材硬度平均为 116 HV, 钎缝硬度平均为 105 HV, 两种钎

焊条件下硬度变化没有明显差别。钎缝的硬度比母材的硬度低, 这主要是因为钎料的硬度本身就比较钎焊前母材的硬度低, 采用氮气保护虽然可以显著地提高钎焊接头的强度, 但是对钎焊接头的显微硬度影响不大。

铝合金的硬度与强度存在一定的线性关系^[8], 对于特定的铝合金来说, 如果硬度降低, 其强度也是降低的, 但其塑性会有所提高。钎焊后母材的硬度比钎焊前的硬度有所下降, 说明其强度也有所下降, 但其塑性至少不会有明显变化, 这和母材显微组织的分析结果相一致。

3 结 论

(1) 铝锂合金钎焊前母材中的强化相以质点的形式存在, 钎焊后母材中的强化相以板条状的形式存在, 强化相长大, 导致钎焊后母材的强度比钎焊前有所下降, 所以铝锂合金钎焊时要严格控制钎焊工件高温停留时间。

(2) 在氮气保护条件下, 钎焊接头未见有气孔、夹渣、裂纹等焊接缺陷, 钎焊接头强度较高; 而无氮气保护的条件下, 钎焊接头有大量的缺陷存在, 这些缺陷的存在严重影响了钎焊接头的强度, 所以氮气保护是提高钎焊接头强度的重要手段之一。

(3) 冶金结合界面及扩散区的存在, 有效地提高了铝锂合金钎焊接头的强度。

参考文献:

[1] 邱惠中. 国外 Al—Li 合金及其航天产品的制造技术[J]. 宇航材料工艺, 1998(4): 39—43.
[2] 王引真, 贺 勇, 王忠平, 等. 热应变对 2090 铝锂合金焊接热影响区显微组织和力学性能的影响[J]. 材料科学与工艺, 1996, 4(3): 81—85.
[3] Sinyavskii V S, Semenov A M. Mechanism of stress corrosion cracking of Al—Li alloys[J]. Protection of Metals, 2002, 38(2): 132—140.
[4] 潘青林, 梁文杰, 周昌荣, 等. 含钎 Al—Cu—Li—Zr 合金[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(S3): 24—27.
[5] 朱朝明, 潘青林, 王新宇, 等. 含钎 Al—Cu—Li—Zr 合金的热处理[J]. 轻合金加工技术, 2005, 33(12): 41—44.
[6] 隆 平, 李 擎, 梁文杰, 等. 热处理对含钎 Al—Cu—Li—Zr 合金组织与性能的影响[J]. 矿冶工程, 2005, 25(5): 62—65.
[7] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册(第 1 卷)—焊接方法及设备(第 2 版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
[8] 林光磊. 6063 铝合金型材维氏硬度与强度的线性关系[J]. 轻合金加工技术, 2002, 30(1): 29—31.

作者简介: 张 玲, 女, 1975 年 12 月出生, 硕士研究生。主要研究方向为新型焊接材料及新工艺。发表论文 1 篇。

Email: zhangling508@126.com

navitics, Nanjing 210016, China; 2. The 14th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210013, China). p53—56

Abstract: Wetting times and wetting forces of Sn-Cu-Ni lead-free solder for different temperatures and three kinds of substrates including Cu, Au/Ni/Cu and SnBi/Cu, were measured by means of wetting balance method. The effects of soldering temperature on wettability of Sn-Cu-Ni lead-free solder on different substrates were also studied. The results indicate that with the increase of temperature, the surface tension of the lead-free solder decreases and the wetting times are reduced observably, and the wetting forces are increased evidently. The wettability of solder on Au/Ni/Cu or SnBi/Cu substrate is better than that on Cu substrate owing to the decrease of the interfacial tension between solder and substrate by way of plating Ni/Au or SnBi coating.

Key words: lead-free solder; Sn-Cu-Ni solder; wettability; coating

On-line weld quality inspection based on weld indentation by using servo gun ZHANG Xiao-yun, ZHANG Yan-song, CHEN Guan-long (School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China). p57—60

Abstract: Resistance spot welding (RSW) is the primary joining method for car-body assembly. Control and inspection of weld quality have great importance to improve the performance of car. Based on the position feedback characteristics of servo encoder, on-line weld quality inspection method was proposed by using weld indentation. A spot welding experimental system including robot, robot controller, servo gun and weld controller was integrated. The developed measurement program was used to acquire weld indentation on-line, and the measured results was calibrated by PLC displacement control system. The experimental results showed that the acquired weld indentation can reflect the real indentation on the 0.8mm low carbon steel (GMW2). The weld quality inspection rate can meet the demand for real production. The proposed on-line weld quality inspection method can meet the demand of welded joint measurement in real plant environment.

Key words: resistance spot welding; servo gun; weld indentation; on-line inspection

Method of welding groove feature design and weld feature recognition LIU Yong¹, WANG Ke-hong¹, DU Shan-shan², XU Yue-lan¹ (1. Material Department of Science & Engineer, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China; 2. Computer School of Science & Technology, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China). p61—64

Abstracts: To solve welding workpiece model, it is important to study welding groove feature design. The design requirements of welding groove were analysed in the numeric CAD/CAPP/ROBOTICS integrated welding. The total scheme was designed to realize the data share between CAD design environment and CAPP/ROBOTICS environment. Firstly a method to model typical welding groove based on groove feature library was given, then a better

method to model universal weld groove driving by program developing based on CAD/CAM platform was provided. And the method of welding groove feature and weld feature recognition was put forward. Example proved that it is correct.

Key words: welding groove; feature design; feature recognition

Fracture microstructures and properties of Al-Li alloy brazed joints ZHANG Ling, XUE Song-bai, SHI Huai-jiang, WU Yu-xiu (College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China). p65—68

Abstract: Microstructures of base metal and brazed joints were analyzed using metallographic microscope, SEM and microhardness instrument and the changing rule of strength of brazed joints was studied by testing microhardness of brazed joints and chemical composition of fracture micro-section. The results show that shape of reinforcing phase of base metal are changed from particle to strip after brazing; there are few defects such as gas pores, slag inclusions, cracks and so on in brazed joints with N₂ atmosphere, which improves mechanical properties of brazed joints effectively, however there are many defects in brazed joints without N₂ atmosphere, which reduces mechanical properties of brazed joints seriously.

Key words: Al-Li alloy; brazed joint; microstructure; microhardness

Intelligent digital control system for CO₂ short circuiting welding

FENG Yue-hai^{1,2}, LIU Jia², YIN Shu-yan², WANG Ke-hong (1. Department of Materials Science & Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. College of Mechanical Engineer and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China). p69—72

Abstract: For the shortage of short circuiting transfer for general CO₂ welding machine, based on the hardware system of digital signal processor and microprocessor control unit, the hierarchical intelligent control theory was applied and the hierarchically intelligent full digital control schematic for CO₂ short circuiting transfer welding was put forward. It integrates the digital PI controller, fuzzy controller and expert system, which make control levels clearer and design scheme easier. The experimental results validate that this system can attain ideal waveform control for CO₂ short-circuit welding and improve CO₂ welding machine performance, and control welding process intelligently.

Key words: digital control system; gas metal arc welding; hierarchical intelligent control

Numerical analysis of multi-pass welding residual stress for typical closed weld CHEN Hu, GONG Jian-ming, TU Shan-dong (Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China). p73—76

Abstract: Two typical closed weld, circular patch weld and nozzle weld, were modeled and 3-D multi-pass welding simulation were performed using FEM. User subroutine were used to realized the moving Gauss distribution of welding heat source. The thermal cycle and residual stresses distribution were obtained. The results show that