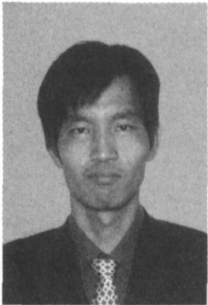


Ti—Si 对 SiC_p/Al 基复合材料等离子弧原位焊接性能的影响

陈希章，雷玉成，李 贤，张建会
(江苏大学 材料科学与工程学院 江苏 镇江 212013)



陈希章

摘 要: 以 Ti—Si 混合粉末作为填充材料, 采用氮氩混合等离子气体对 SiC_p/Al 基复合材料进行等离子弧原位焊接, 分析 SiC_p/Al 基复合材料的焊接性。结果表明, 填充 Ti—Si 混合粉末进行等离子弧原位焊接时接头组织致密, 结合较好, 焊缝组织中生成了新的增强颗粒, 未发现明显的针状相生成, 从而有效地提高了接头的力学性能。力学性能试验表明, 采用 Ti—Si 混合粉末进行等离子弧原位焊接所获得的抗拉强度为 232.3 MPa。此外探讨了焊接接头中气孔形成的机制以及应采取的相应措施。

关键词: SiC_p/Al 基复合材料; 等离子弧; 原位焊接; Ti—Si 混合粉末

中图分类号: TG456 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2007)11-013-04

0 序 言

SiC_p/Al 基复合材料由于具有优异的物理、力学综合性能, 而广泛应用于航天、航空、汽车和制造业等领域, 被认为是一种具有广泛潜在应用前景的结构材料。同其它结构材料一样, 它在实际中的应用, 也往往受制于二次加工工艺性能的限制^[1-3]。SiC_p/Al 基复合材料的界面属于反应型界面, SiC 与铝合金熔体之间容易发生界面反应, 生成脆性相 Al₄C₃。该相会与水起化学反应, 它的产生严重损害了材料的力学性能。在焊缝中加入强碳化物形成元素 Ti, 对 SiC_p/Al 基复合材料进行等离子弧原位焊接, 使其在凝固过程中优先与碳结合形成高稳定的碳化物, 从而抑制了脆性相 Al₄C₃ 的生成。但在焊缝中仍然存在钛的未熔合、气孔、裂纹等缺陷^[4]。为此, 希望能更好地改善材料的界面润湿性和熔池的流动性。Si 元素是铝合金中最常见的元素, 以前的研究表明^[5-8], Si 元素对此具有一定的影响。Si 元素能抑制连续的 Al₄C₃ 层在界面处形成及 SiC 表面的溶解和重组过程, 是改善润湿性的关键因素。此外在熔池中增加 Si 元素的含量, 还可使 Si 元素的活度增大, SiC_p/Al 界面反应的生成自由能增大, 从而减轻或抑制界面反应的发生。采用以 Ti—Si 混合粉末(钛的质量分数为 95%)为填充材料, 以无水乙醇作

为黏合剂, 以氩、氮混合气体作为等离子气, 在相同的焊接工艺条件下, 对复合材料进行原位焊接, 以期改善焊缝组织, 提高接头的性能。

1 试 验

试验材料为挤压铸造法制造的以 SiC 为强化相的 6061Al 基复合材料(SiC_p/Al MMCS), 其中强化相直径为 $\phi 6\mu\text{m}$, 体积分数为 10%, 在基体中分布不均匀。其化学成分见表 1。拉伸试验测定其屈服强度为 398.5 MPa, 材料厚度为 3.5 mm。显微组织见图 1。

表 1 基体材料的化学成分(质量分数, %)
Table 1 Chemical composition of aluminum alloy

Cu	Mg	Mn	Ni	Si	Ti	Al
0.35	0.76	0.25	< 0.05	1.25	< 0.05	余量

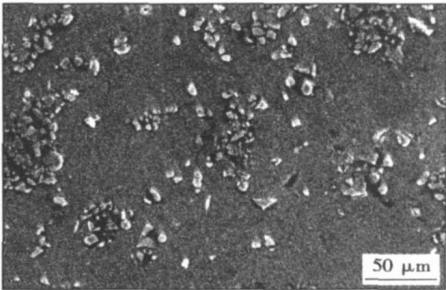


图 1 SiC_p/6061Al MMCS 显微组织

Fig. 1 Microstructure of SiC_p/6061Al MMCS

试验使用钨极氩弧焊机 AC/DC TIG 500 GP 和 HPT-8 等离子焊枪进行焊接。焊前母材开 45°V 形坡口,用 150 号砂纸进行打磨以去除氧化膜,然后用丙酮进行清洗。焊完后在试件的横断面(与焊接方向垂直面)上制取金相试样,用 3%~5% 的 keller 溶液腐蚀后用 S-570 线性扫描电子显微镜(SEM)观察焊缝的显微组织,用 D_{max}-rB 旋转阳极 X 射线衍射仪(XRD)观察焊缝微观组织结构。拉伸试验在美国 Instron 公司生产的万能试验机上进行,拉伸速度为 0.5 mm/min,按照国家标准 GB/T228-2002 进行拉伸试验。用扫描电镜观察拉伸试样的断口,并拍摄断口 SEM 电镜照片,相关焊接工艺参数见表 2。

表 2 焊接工艺参数

Table 2 Welding parameters

保护气流量	离子气流量	氩氮体积比	焊接速度	焊接电流
$Q_t/(L\cdot\text{min}^{-1})$	$Q_a/(L\cdot\text{min}^{-1})$	r	$v/(mm\cdot\text{min}^{-1})$	I/A
5~15	2~5	<1:1	80~150	80~130

2 试验结果及分析

2.1 焊接接头微观组织观察

图 2 为填加 Ti-Si 混合粉末进行等离子弧原位焊接时焊接接头宏观 SEM 照片。从图中可以看出,接头区域结合状态良好,焊缝与母材的熔合线区域过渡平滑,没有明显的未熔合现象。焊缝组织致密,除有个别气孔和夹杂外,无明显其它缺陷,焊缝接头整体质量较好。

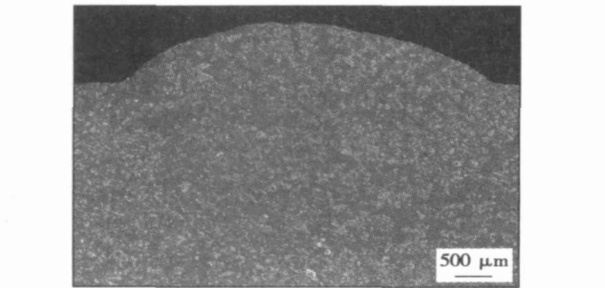


图 2 填加 Ti-Si 混合粉末时焊接接头宏观 SEM 形貌
Fig. 2 SEM photo of welded joint with Ti-Si mixed powder

图 3a 为填加 Ti-Si 混合粉末进行等离子弧原位焊接时焊缝区域的微观组织照片。可看出焊缝组织致密,颗粒分布较均匀,除在局部区域团聚严重,在电镜下观察到部分气孔外,无其它明显的缺陷。焊缝中 SiC 颗粒与铝之间有清晰的界面,没有界面反应的迹象,焊缝中也没有发现明显的 Al₄C₃ 存在。表明在焊接过程中加入 Si 元素后,增加了熔池中 Si 元素的浓

度,改善了熔池的流动性,减少了 SiC 的分解,有效地抑制了脆性相的形成。焊缝中颗粒的体积分数约为 15%,尺寸在 3~25 μm 之间。图 3b 为填加 Ti-Si 混合粉末进行等离子弧原位焊接时熔合区的微观组织照片,从图中可以看出,熔合区组织内部虽然没有发现针状脆性相 Al₄C₃ 的生成,但其中气孔数目增多, SiC 颗粒偏聚现象也较焊缝区严重,颗粒的体积分数约为 20%,较之焊缝区略有增加。

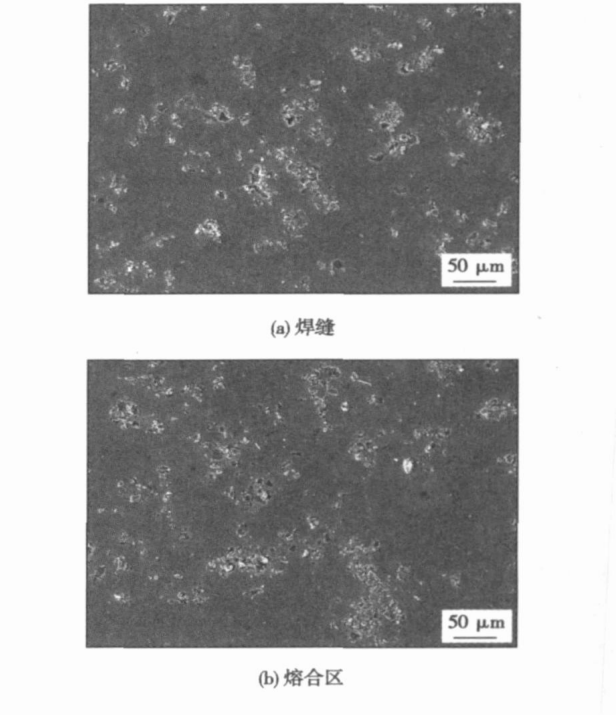


图 3 填加 Ti-Si 混合粉末时焊接接头微观组织 SEM 形貌
Fig. 3 SEM micrograph of joint with Ti-Si mixed powder

2.2 焊缝组织及增强相

在焊接工艺条件下,焊缝合金体系中各元素能相互反应。与添加钛的研究比较^[4,5],该体系中 Si 元素的含量较高,生成的颗粒相也不同。图 4 为在试验条件下填加 Ti-Si 混合粉末时焊缝的 XRD 图。

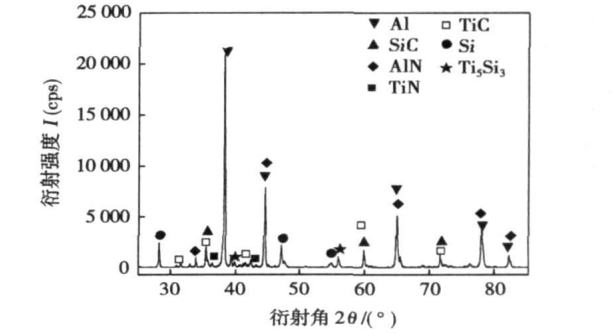


图 4 填加 Ti-Si 混合粉末等离子弧原位焊缝组织 XRD 图
Fig. 4 XRD of weld with Ti-Si mixed powder

可以看出,除生成 TiN, TiC 和 AlN 外,由于 Ti₅Si₃ 的熔点(2 120 ℃)远高于 AlTi 的熔点(1 350 ℃)和 TiAl 的熔点(1 460 ℃),因此,熔池中优先析出 Ti₅Si₃ 相,这就造成熔池中钛的含量大大减少,而且熔池凝固速度较快,因此抑制了铝钛化学物的形成。焊缝组织由 α-Al, TiN, TiC, AlN, Ti₅Si₃, SiC, Si 等相组成。

2.3 焊接接头强度分析

对接头进行拉伸试验,结果表明抗拉强度为 232.3 MPa,达到母材强度的 58.3%。表明加入的 Si 元素初步起到了改善熔池流动性和其冶金状态,提高接头性能的效果。

图 5 为填加 Ti-Si 混合粉末时接头断口形貌。可以看出,断口中有一些韧窝,表现出一定的韧性,但主要表现出脆性。断口中可以观察到裸露的增强颗粒,表明具有脱粘现象。断口位于半熔化区附近,因而可以认为半熔化区是结合最差的区域。造成这种情况的原因是半熔化区是焊缝与母材的过渡区域,从上面的分析也可知,半熔化区气孔的敏感性较大,颗粒偏聚也较严重,此外,由于半熔化区 Si 元素的含量比焊缝低,发生界面反应的可能性较大,以上各种情况相互作用,从而造成半熔化区易脆断。

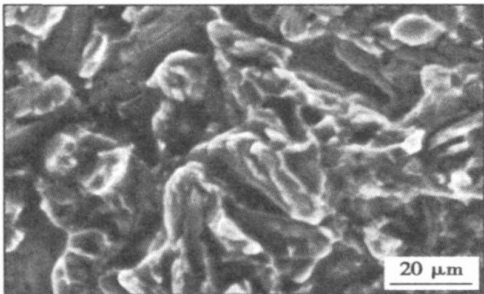


图 5 填加 Ti-Si 混合粉末时接头断口

Fig. 5 Fractograph of joint with Ti-Si mixed powder

2.4 焊接接头气孔形成机制探讨

等离子弧原位焊接 SiC_p/Al 基复合材料时,焊接接头处存有气孔,在焊缝半熔化区尤为严重。这些气孔的存在严重影响着焊缝的力学性能。因此探讨气孔在 SiC_p/Al 基复合材料等 离子弧焊接中的形成机制,对于减少或消除气孔的形成,提高焊缝的性能是大有益处的。

图 6 为焊接接头气孔金相照片,可以看出气孔形貌多为规则的圆形、椭圆形,但也有不规则的形貌。这与等 离子弧的焊接特点以及 SiC_p/Al 基复合材料本身有关。试验中所采用的 SiC_p/Al 基复合材料是由挤压铸造法制备的,增强相 SiC 颗粒尺寸较

小(平均直径只有 φ6 μm),容易吸附气体,同时材料本身内部存在一定的气体,在等 离子弧原位焊接 SiC_p/Al 基复合材料时, SiC 颗粒溶解放气,黏合剂挥发分解,阻塞在 SiC_p/Al 基复合材料中的气体在铝基体熔化时也放出,从而形成气孔。此外,等 离子弧原位焊接时,半熔化区中增强相 SiC 颗粒未完全溶解造成熔池流动性不好,离子气中的气体在熔池凝固的过程中,如果来不及逸出,也会残留在溶液中形成气孔,严重时甚至形成疏松。而气孔的形貌则和熔池的形成条件有关^[9]。当焊缝区和半熔化区的尺寸较宽时,在熔池凝固的过程中,气体在其中能够自由长大,在表面张力作用下,长成球状或椭圆形。而当焊缝和半熔化区的尺寸比较小时,内部所受的约束比较大,使得形成的气孔不能自由张大。在应力和表面张力作用下,固溶于半熔化区中的气体向气孔内扩散,使气孔内的压力增大。当气孔内压力大到超过外界对其约束后,气孔便向外扩展,但其扩展只能向半熔化区中薄弱部位扩展,从而呈现出拉长的不规则气孔。也有研究认为^[10],熔焊时熔合区和部分热影响区(HAZ)的球形气孔和伸长气孔的生成是由 Mg 元素的挥发造成的,但在试验中未发现随 Mg 元素的增加气孔明显增大增多的现象,有关气孔形成机制的研究有待进一步认识。

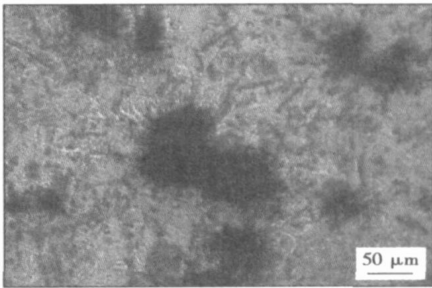


图 6 焊接接头气孔金相组织

Fig. 6 Photograph of pore in welded joint

综合以上的分析,减少或消除气孔在焊缝接头处的形成,可以从以下几方面采取措施。

- (1) 焊前采用真空预热的方法对 SiC_p/6061Al 基复合材料进行去气处理。
- (2) 增大增强相 SiC 颗粒的尺寸,减小 SiC 的活性。
- (3) 在保证焊件被焊透的情况下,尽量减小焊接能量的输入,提高焊接速度,缩短等 离子电弧作用在焊件上的时间,并采用散热系数相对高的材料对焊件进行散热处理,从而最大程度地减小半熔化区尺寸及缩短半熔化区液相持续的时间。

3 结 论

(1) 采用氮、氩混合离子气, 填加 Ti—Si 混合粉末对 SiC_p/Al MMCs 进行等离子弧原位焊接时, 焊接接头组织致密, 焊缝中没有发现 Al₄C₃ 的存在, 接头整体质量较好。焊缝获得了由 α-Al, TiN, TiC, AlN, Ti₅Si₃, SiC, Si 等相组成的焊缝组织。

(2) 填加 Ti—Si 混合粉末进行等离子弧原位焊接, 焊接接头抗拉强度达到了 232.3 MPa, 为母材强度的 58.3%。拉伸断口中有一些韧窝, 表现出一定的韧性, 但主要表现出脆性。

(3) 填加 Ti—Si 混合粉末进行等离子弧原位焊接, 焊接接头处的气孔与等离子弧的焊接特点以及 SiC_p/Al 基复合材料本身有关, 而气孔的形貌则和熔池的凝固速度有关。

参考文献:

[1] 刘黎明, 祝美丽, 徐卫平, 等. 铝基复合材料 SiC_w/6061Al 的激光焊接[J]. 焊接学报, 2001, 22(4): 13—16.
[2] YAN Jiuchun, XU Zhiwu, WU Gaohui, *et al.* Interface structure and mechanical performance of TLP bonded joints of Al₂O₃/6061Al com-

posites using Cu/Ni composite interlayers[J]. Scripta Materialia, 2004, 51: 147—150.
[3] Ellis M B D. Joining of aluminum based metal matrix composites[J]. International Material Reviews, 1996, 41(2): 41—58.
[4] 雷玉成, 袁为进, 朱 飞, 等. 等离子弧焊接 SiC_p/Al 基复合材料焊缝“原位”合金化分析[J]. 焊接学报, 2005, 26(12): 13—16.
[5] 陈 建, 潘复生. 合金元素影响铝/陶瓷界面润湿性的研究现状[J]. 兵器材料科学与工程, 1999, 22(4): 55—57.
[6] 郭 建, 沈宁福. SiC 颗粒增强 Al 基复合材料中有害界面反应的控制[J]. 材料科学与工程, 2002, 20(4): 605—608.
[7] 郭绍庆, 袁 鸿, 谷卫华, 等. SiC_p/Al 的熔化焊及高能束焊研究现状[J]. 宇航材料工艺, 2005 4: 19—23.
[8] Lseki T, Kameda T, Maruyama T. Interfacial reactions between SiC and Al during joining[J]. Journal of Material Science, 1984, 19(6): 1892—1898.
[9] 陈永来. SiC_p/6061Al 金属基复合材料焊缝“原位”合金化激光焊接及其物理冶金问题研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2000.
[10] Huang R Y, Chen S C, Huang J C. Electron and laser beam welding of high strain rate superplastic Al—6061 SiC composites[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2001, 32A(10): 2575—2584.

作者简介: 陈希章 男, 1976 年出生, 博士, 讲师。主要从事焊接工艺及设备, 机器人焊接智能化, 先进连接技术等方面的研究与开发。发表论文 10 余篇。
Email: xzhchen @uj.s.edu.cn

[上接第 12 页]

参考文献:

[1] 霍宏伟, 李 瑛, 王赫男, 等. 镁合金的腐蚀与防护[J]. 材料导报, 2001, 15(7): 25—27.
[2] 关绍康, 王迎新. Al5TiB₂-RE 对 Mg—8Zn—4Al—0.3Mn 合金显微组织和时效过程的影响[C] // 2002 年材料科学与工程新进展. 北京: 冶金工业出版社, 2003.
[3] 张 静, 潘复生, 郭正晓, 等. 含铝和含锰镁合金系中的合金相[C] // 2002 年材料科学与工程新进展. 北京: 冶金工业出版社, 2003.
[4] 李卫平, 朱立群. 镁及其合金表面防护性涂层国外研究进展[J]. 材料保护, 2005, 38(2): 41—46.
[5] Chiu L H, Lin H A, Chen C C. Effect of aluminum coatings on corrosion properties of AZ31 magnesium alloy[R]. Material Science Forum, 2003.

[6] Zhao Z B, Gillispie B A, Smith J R. Coating deposition by the kinetic spray process[J]. Surface and Coating Technology, 2005, 25: 1—9.
[7] Voyer J, Stoltenhoff T, Kreye H. Development of cold gas sprayed coating[C] // Thermal Spray 2003. ASM International. USA: Materials Park OH, 2003.
[8] 王佳杰, 魏尊杰, 霍树斌, 等. 超音速冷气动力喷涂 Cu 涂层的结合机理[J]. 焊接, 2005, 9: 36—39.
[9] 孙振岩, 刘春明. 合金中的扩散与相变[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2002.
[10] Zhang M X, Kelly P M. Surface alloying of AZ91D by diffusion coating[J]. Journal of Materials Research, 2002, 17(10): 2477—2479.
[11] 李松瑞, 周善初. 金属热处理[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2003.

作者简介: 袁晓光 男, 1963 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。研究方向为表面强化技术, 获得省部级科技进步二、三等奖 4 项, 发明专利 4 项。发表论文 60 余篇。
Email: yuanyg@sut.edu.cn

MAIN TOPICS, ABSTRACTS & KEY WORDS

TIG arc constricted by rotating ceramic plates ZHU Liang, ZHANG Renjun, TIAN Yuji (State Key Laboratory of Gansu Advanced Non-ferrous Metal Materials, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China). p1—4

Abstract: Arc constriction is an effective approach to enhance the heat intensity of TIG (tungsten inert-gas) arc. A novel approach to constrict the TIG arc was presented. By means of double ceramic plates with parallel rotation, the arc near the electrode was constricted. Through observation of the arc shapes and measurement of the welds cross-sections, the arc shapes and its heat characteristics have been investigated at a variety of constriction conditions given by the rotating ceramic plates. The results show that the axially asymmetrical constriction of TIG arc was made by rotating ceramic plates. In the direction perpendicular to the rotating plane of ceramic plates, the central current carried column of the arc was constricted stably. Decrease of the distance between two ceramic plates and increase of the depth for the arc entering into the ceramic plate gap gave rise to the further constriction of the central current carried column of the arc, and in turn increase the penetration of welds. Furthermore, the arc voltage was increase slightly when the constriction extent became stronger.

Key words: constricted arc; rotating ceramic plates; arc profile

3D modeling of task space for tele-robotic welding based on stereo vision GAO Hongming, LIANG Zhimin, DONG Na, WU Lin (State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China). p5—8

Abstract: In order to overcome the disadvantage of the human tele-operation, there is need to improve the intelligence level of the tele-robotic welding system. Accurate 3D modeling of the task space is the essential foundation for telerobotic planning, motion control and other automatic function. Stereo vision is employed for task space analysis and 3D reconstruction of telerobotic welding. Stereo matching is accomplished by man-machine interaction combined with subpixel corner feature detection algorithm, in which the Harris corner is first detected then the subpixel refine is made. So that the complicated calculation and low robustness of the automatic visual modeling algorithm is avoided. The experimental 3D reconstruction results of task space have shown the validity of the technique.

Key words: stereo vision; telerobotic welding; 3D reconstruction; task space

Influence of heat treatment on interfacial diffusion of Al alloy cold spraying coating on magnesium alloy YUAN Xiaoguang, LIU Yanxue, WANG Yisong, HUANG Hongjun (School of Material Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110023, China). p9—12, 16

Abstract: The Al-12Si-3Fe-3Mn-2Ni alloy powder has been sprayed on the surface of magnesium alloy with cold spraying technology. The interface morphology between substrate alloy and coating has been investigated. The effect of heat treatment temperature and holding time on the diffusion behavior between coating and substrate alloy has been studied. The results show that the Al-12Si-3Fe-3Mn-2Ni alloy powder coating by cold spraying technology becomes more density and homogeneous after heat treatment. Al in the coating diffuses into the substrate alloy and Mg in the substrate alloy diffuses into the coating. Moreover, the diffusion amount diffused into the coating from the substrate alloy is more than that diffused into the substrate alloy from the coating. With an increase of temperature and holding time, the diffusion degree of Al and Mg between the coating and substrate alloy get sufficient. However, the diffusion layer varies little when the temperature rises to 300 °C and the holding time increases to 3 h. Little diffusion of other alloying elements in the coating and substrate alloy has been observed.

Key words: magnesium alloy; cold spraying; aluminum alloy powder; diffusion

Effects of Ti—Si on properties of plasma arc “in-situ” welding for SiC_p/Al MMCs CHEN Xizhang, LEI Yucheng, LI Xian, ZHANG Jianhui (School of Material Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China). p13—16

Abstract: In order to analyze weldability of SiC particle reinforced aluminum metal matrix composites (SiC_p/Al MMCs), plasma arc “in-situ” welding of SiC_p/Al MMCs are carried out using argon-nitrogen mixture as plasma gases and Ti—Si mixed powder as “in-situ” welded material. The results show that the dense metallurgical joining with obscure interface could be acquired by adding Ti-Si mixed powder into the pool and new composite reinforced are produced in the weld, and the needle-like phases are not found yet, ensuring the quality of joints. The mechanical testing results show that the maximum tensile strength obtained with Ti-Si mixed powder as “in-situ” material are 232.3 MPa. Furthermore the forming mechanism of porosity in welded joint and the corresponding measures are discussed.

Key words: SiC_p/Al metal matrix composites; plasma arc; in-situ welding; Ti-Si

Material flow patterns in friction stir welding ZHANG Zhao, LIU Yali, CHEN Jintao, ZHANG Hongwu (State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China). p17—21

Abstract: Friction stir welding process is simulated by using a fully coupled thermo-mechanical model. The material flow patterns in the friction stir welding process are analyzed. The comparison with