

## FeAl 多孔材料与不锈钢的焊接

高海燕<sup>1</sup>, 贺跃辉<sup>1</sup>, 沈培智<sup>1</sup>, 江 焱<sup>1</sup>, 黄伯云<sup>1</sup>, 徐南平<sup>2</sup>

(1. 中南大学 粉末冶金国家重点实验室, 长沙 410083;

2. 南京工业大学 膜科学技术研究所, 南京 210009)

**摘 要:** 采用真空钎焊工艺, 以 Cu-Sn 混合粉末压坯为钎料, 研究 FeAl 多孔材料与不锈钢的焊接性能。结果表明: 钎料成分和焊接工艺参数对 FeAl 多孔材料和 434L 不锈钢的焊接性能影响显著, 焊接过程中成分为 Cu-25%Sn(质量分数)的粉末压坯钎料在焊缝处生成  $\text{Cu}_{81}\text{Sn}_{22}$  和  $\text{Cu}_{10}\text{Sn}_3$  两种金属间化合物, 成分为 Cu-10%Sn 的粉末压坯钎料在焊缝处生成(Cu, Sn)固溶体; 采用 Cu-10%Sn 粉末压坯为钎料, 真空下经过 940 °C 保温 15 min, FeAl 多孔材料与不锈钢通过(Cu, Sn)连接可获得良好的焊接接头, 得到的 FeAl 多孔材料与不锈钢焊接后的抗拉强度为 83.9 MPa, 可达到 FeAl 多孔材料母体抗拉强度的 90.6%; FeAl 多孔材料与不锈钢的真空钎焊机理为液态钎料对被焊母体的粘结连接及钎料元素与被焊母体元素间的互扩散和反应。

**关键词:** FeAl; 多孔材料; 真空钎焊; 焊接性能

中图分类号: TG 146

文献标识码: A

## Welding of FeAl porous material and stainless steel

GAO Hai-yan<sup>1</sup>, HE Yue-hui<sup>1</sup>, SHEN Pei-zhi<sup>1</sup>, JIANG Yao<sup>1</sup>, HUANG Bai-yun<sup>1</sup>, XU Nan-ping<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Membrane Science and Technology Research Center, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

**Abstract:** FeAl porous material and stainless steel were welded by vacuum brazing using Cu-Sn green compact as brazing filler. The weldability of FeAl porous material with stainless steel was investigated. The results show that the composition and parameters of vacuum brazing have great effect on the tensile strength of welded FeAl porous material and stainless steel.  $\text{Cu}_{81}\text{Sn}_{22}$  and  $\text{Cu}_{10}\text{Sn}_3$  intermetallics are formed in the brazing line when the filler composition is Cu-25%Sn. (Cu, Sn) solid solution is formed in the brazing line when the filler composition is Cu-10%Sn. After brazing at 940 °C for 15 min using Cu-10%Sn as brazing filler, the brazed FeAl porous material and stainless steel obtain the best tensile strength of 83.9 MPa, that is 90.6% of the tensile strength of FeAl porous material. The brazing mechanisms are the matrix materials joined by liquid brazing filler and the interdiffusion and reaction between the elements in filler and matrix materials.

**Key words:** FeAl; porous material; vacuum brazing; weldability

Fe-Al 金属间化合物作为一种工程应用材料, 焊接问题是其实用化过程中所面临的问题之一, 其中包括: Fe-Al 金属间化合物自身的焊接以及它和异体材料的焊接, 如碳钢和不锈钢等。

现有的实验研究结果表明, Fe-Al 金属间化合物的焊接性能较差<sup>[1-2]</sup>。在熔焊中的主要问题是冷裂纹和热裂纹<sup>[3]</sup>。针对冷裂纹和热裂纹的问题, 目前采取的主要措施是减少焊接熔池中扩散氢的来源, 强化熔池

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(20636020); 国家杰出青年基金资助项目(50825102); 湖南省自然科学基金资助项目(05jj30097)

收稿日期: 2008-05-19; 修订日期: 2008-11-14

通讯作者: 贺跃辉, 教授, 博士; 电话/传真: 0731-8836144; E-mail: yuehui@mail.csu.edu.cn

保护,削弱接头区在焊接过程中的拘束应力(热应力)和焊后残余应力,优化焊缝金属成分和组织性能等。在钎焊及扩散焊中的主要问题是接头区难以得到良好的力学性能<sup>[4]</sup>,解决钎焊及扩散焊中问题的主要措施是提高焊接参数和研制新型钎料。采取以上措施虽然具有较好的效果,但大多增加了工艺难度,使焊接条件苛刻或成本高、效率低,在实际应用上有很大限制甚至难以实现<sup>[5]</sup>。

虽然已有采用氩弧焊<sup>[6]</sup>、激光焊<sup>[1]</sup>、真空钎焊<sup>[5]</sup>以及扩散焊<sup>[7-8]</sup>等焊接工艺对 Fe-Al 致密材料进行焊接的研究,并取得一些成果,但对有关问题的认识还不够充分和深入,离实际应用要求还有相当大的差距。金属间化合物多孔材料是继陶瓷多孔材料和金属多孔材料之后的一种新型无机多孔材料<sup>[9-12]</sup>。目前,关于 Fe-Al 多孔材料焊接性能的研究还未见报道,因此,有必要深入开展这方面的研究。本文作者采用真空钎焊研究了 FeAl 多孔材料的焊接性能。

## 1 实验

采用 Fe 与 Al 质量比为 3:1 的粉末为原料,经冷压制备成尺寸为 20 mm×5 mm×3 mm 的试样。于钨发热体真空烧结炉内(真空度为  $10^{-3}$  Pa)进行反应烧结,利用 Kirkendall 效应及反应造孔,合成 FeAl 多孔材料。经测试,用于焊接的 FeAl 多孔材料的孔隙度为 35.2%,最大孔径为 3.5  $\mu\text{m}$ ,抗拉强度为 92.6 MPa。选用 434L 不锈钢作为异焊材料,切割成尺寸为 20 mm×5 mm×3 mm 的试样。由于 Cu 与 FeAl 具有较好的润湿性<sup>[13]</sup>,所以,选用铜基合金作为真空钎焊的钎料。为了降低钎料的熔点,选用 Sn 作为合金元素添加到铜基钎料中。钎料成分分别选用 Cu-10%Sn, Cu-20%Sn, Cu-25%Sn 和 Cu-30%Sn 以研究钎料成分对焊接性能的影响。不同成分配比的钎料粉末分别混合均匀,采用模压压制成尺寸为 5 mm×3 mm×0.4 mm 的粉末压坯钎料。FeAl 多孔材料与不锈钢钎焊试样装配示意图如图 1 所示。

采用 FBP-3III 型多孔材料性能测试仪检测 FeAl 多孔材料焊接前后的孔隙度、最大孔径和透气度等孔结构参数。采用日本 D/MAX-3A 型 X 射线衍射仪分析材料的物相组成,工作电压为 50 kV,工作电流为 20 mA, Cu  $K_{\alpha}$  射线,扫描速度为 5 ( $^{\circ}$ )/min。采用日本 JEOL 公司的 JSM-6360LV 型扫描电镜对 FeAl 多孔材料与不锈钢焊接后的微观组织形貌及拉伸试样的断口

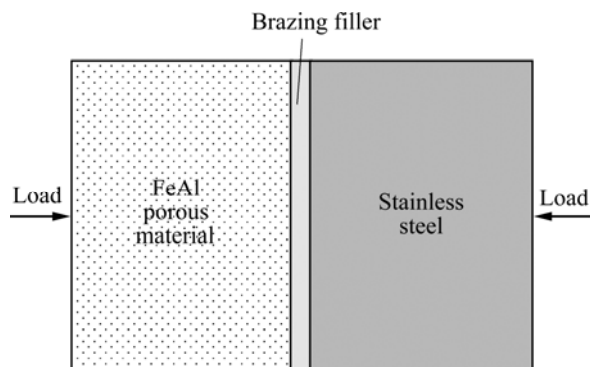


图 1 真空钎焊装配示意图

Fig.1 Schematic diagram of assembly for vacuum brazing

进行分析,同时利用能谱分析仪(EDX)分析各个相的元素组成及其含量。采用型号为 CMT7205 的微机控制电子万能试验机,测试焊接前后试样的抗拉强度。

## 2 结果与讨论

### 2.1 钎料成分对焊接力学性能的影响

实验中采用 Cu-10%Sn, Cu-20%Sn, Cu-25%Sn 和 Cu-30%Sn 4 种成分配比的铜基钎料。根据 Cu-Sn 相图<sup>[14]</sup>这 4 种钎料出现稳定液相的温度分别约为 850, 798, 770 和 755  $^{\circ}\text{C}$ ,确定焊接温度分别为 940, 880, 820 和 800  $^{\circ}\text{C}$ , FeAl 多孔材料与 434L 不锈钢采用 4 种不同钎料焊接后,抗拉强度测试结果如图 2 所示。由图 2 可知,在所选成分范围内,Cu-10%Sn 钎料的焊后抗拉强度最高。

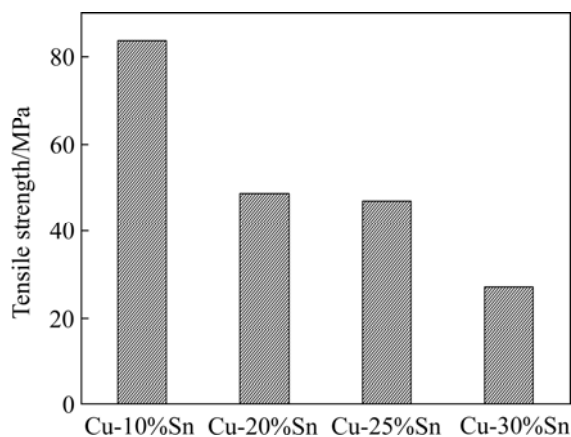


图 2 4 种不同成分配比的 Cu-Sn 钎料焊后的抗拉强度

Fig.2 Tensile strength of welded FeAl porous materials using different compositions of Cu-Sn filler

## 2.2 焊接接头的显微组织

图3所示为采用Cu-25%Sn为钎料焊接FeAl多孔材料与不锈钢的焊接接头处的显微组织,该焊接工艺为820℃保温15min。由图3可知,焊接接头结合良好,经抗拉强度测试,本试样的抗拉强度为46.9MPa。图3所示的焊接接头微观组织从左至右可分为5层:1) FeAl多孔材料层;2) FeAl与钎料的扩散反应层;3) 钎料层;4) 钎料与不锈钢的扩散反应层;5) 不锈钢层。

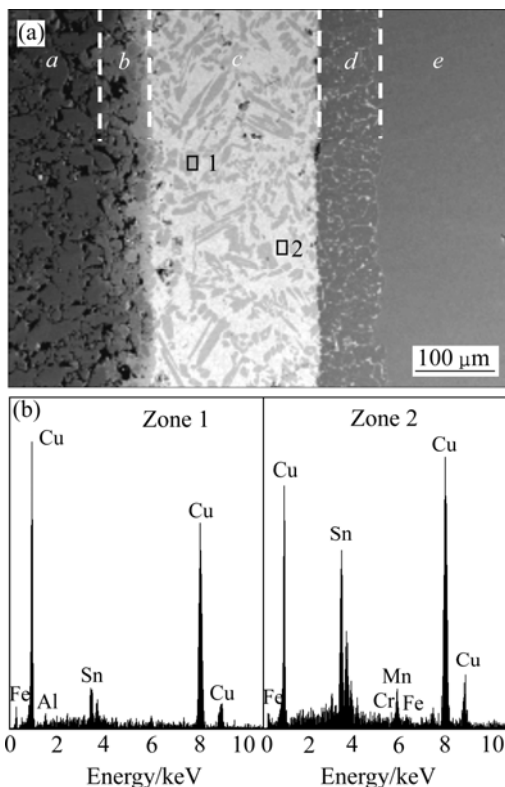


图3 Cu-25%Sn钎料焊接接头显微组织

**Fig.3** BES image (a) of welded FeAl porous alloy and stainless steel using Cu-25%Sn as brazing filler and corresponding EDX analysis (b)

对钎料层1和2进行能谱分析,并结合XRD谱(见图4)分析得知,该钎料层内长条状组织为 $\text{Cu}_{81}\text{Sn}_{22}$ 相,钎料层内灰白色区域为 $\text{Cu}_{10}\text{Sn}_3$ 相。即在FeAl多孔材料与不锈钢的焊接过程中,钎料层的Cu和Sn元素之间发生反应生成2种铜锡金属间化合物 $\text{Cu}_{81}\text{Sn}_{22}$ 和 $\text{Cu}_{10}\text{Sn}_3$ 。而且,由能谱分析可知,在钎料元素向焊接母体扩散的同时,焊接母体(包括FeAl多孔材料与不锈钢)中的元素也向钎料层发生扩散,因此,整个焊接过程是钎料对被焊母体的粘结以及钎料元素与焊接母体元素间的互扩散过程。

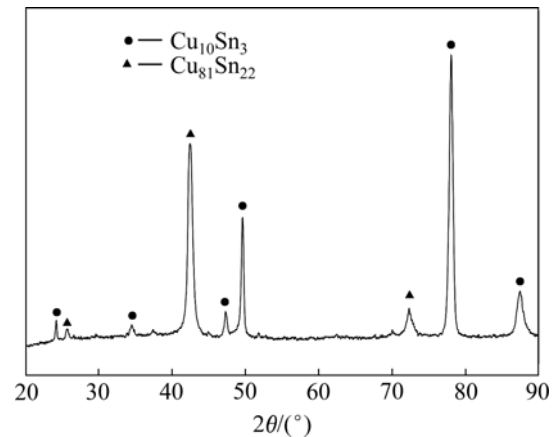


图4 Cu-25%Sn钎料焊接FeAl多孔材料与不锈钢钎料层的XRD谱

**Fig.4** XRD patterns of filler using Cu-25%Sn as brazing filler

图5所示为采用Cu-10%Sn钎料焊接FeAl多孔材料与不锈钢的SEM像,该焊接工艺为940℃保温15min。由图可知,焊接接头结合良好。在焊接过程中,由于液态钎料的黏度较大,钎料沿毛细管力较大的FeAl多孔材料和不锈钢的晶界扩散,因此,液态钎

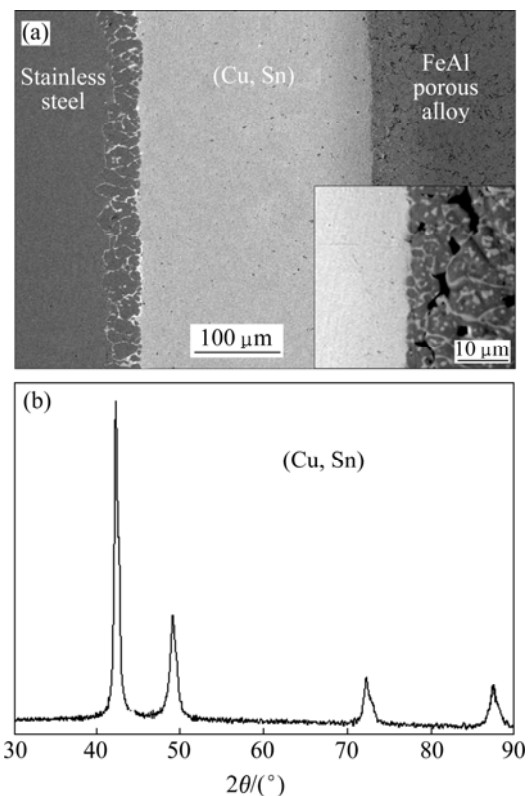


图5 Cu-10%Sn钎料焊接接头的显微组织及焊缝中心区域的XRD

**Fig.5** BES image (a) of welded FeAl porous material using Cu-10%Sn as brazing filler and XRD pattern (b) of filler center

料并没有将 FeAl 多孔材料的孔隙填充(见图 5(a)中插图), 这既有利于 FeAl 多孔材料孔结构参数的稳定性, 又不致使钎料向多孔体内流失。经测试得知, 本试样的抗拉强度为 83.9 MPa。对钎料层进行 XRD 分析得知, 焊接钎料层为铜锡固溶体(Cu, Sn)。而采用 Cu-25%Sn 钎料的焊接接头为铜锡金属间化合物  $\text{Cu}_{81}\text{Sn}_{22}$  和  $\text{Cu}_{10}\text{Sn}_3$ , 因此, 不同的焊接钎料会获得不同的焊缝组织, 进而影响最终的焊接力学性能。

对 FeAl 多孔材料与不锈钢的焊接试样进行拉伸强度测试, 结果表明, 试样全部断裂于钎料与 FeAl 多孔材料的结合面(见图 6(a))。图 6(a)中箭头所指断口显微形貌如图 6(b)所示, 断口显示为解理断裂特征且有大量孔洞存在, 正是由于 FeAl 多孔材料表面大量孔隙的存在, 且焊接过程中液态钎料并不会将孔隙填充, 孔隙削弱了 FeAl 与钎料的结合面积, 故该结合面为焊接后的薄弱面。

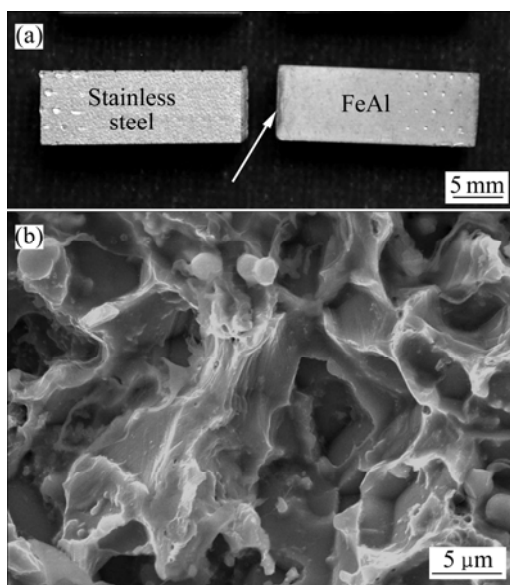


图 6 FeAl 多孔材料与不锈钢焊接的断口特征

**Fig.6** Fractural characteristics of welded FeAl porous and stainless steel: (a) Macrograph of fractured sample; (b) SEM image fractured section

## 2.3 焊接工艺参数对抗拉强度的影响

### 2.3.1 焊接温度的影响

实验中以 Cu-10%Sn 为钎料, 由于本研究所用钎料为混合粉末压坯, 焊接升温过程中钎料粉末压坯中的元素间会发生反应, 因此, 明确升温过程中该成分钎料的物相变化对确定焊接温度尤为必要。根据 Cu-Sn 二元相图<sup>[15]</sup>, 当温度升高至 232 °C 时, Sn 开始熔化, 并流入和铺散在压坯的孔隙内, Cu 在液态 Sn

中溶解, 经共晶反应生成  $\eta$  相(约 60% Sn)。继续升温, 液相又不断使 Cu 溶解, 最后得到以 Cu 为基体的  $\alpha$ -(Cu, Sn)固溶体。对于含 10% Sn 的合金粉末, 只有当烧结温度超过 850 °C 后才会出现稳定的液相<sup>[14]</sup>。

因此, 焊接过程中要保证钎料内有液相, 则焊接温度需大于 850 °C。图 7 所示为不同焊接温度下保温 15 min 的 FeAl 多孔材料和不锈钢焊接试样的抗拉强度与焊接温度的关系曲线。由图 7 可知, 当焊接温度低于 940 °C 时, 抗拉强度随焊接温度的升高而直线递增。焊接温度为 940 °C 时达到最大值 83.9 MPa, 约为 FeAl 多孔材料母体抗拉强度(92.0 MPa)的 91.2%。当焊接温度超过 940 °C 后, 焊接强度急剧降低。

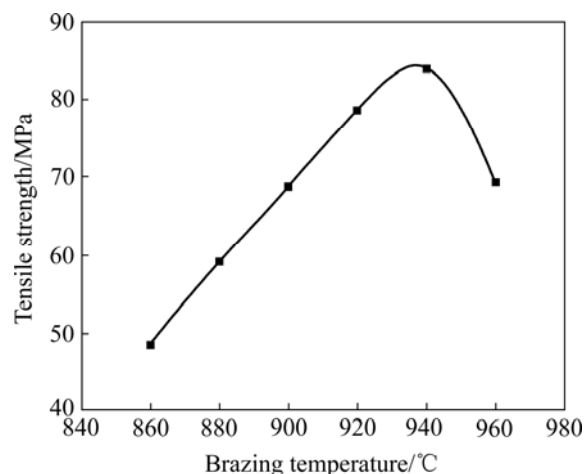


图 7 焊接温度对 FeAl 多孔材料抗拉强度的影响

**Fig.7** Effect of brazing temperature on tensile strength of welded FeAl porous material

焊接温度对于形成液相钎料的表面张力有一定影响, 约特佛斯给出温度与表面张力之间的关系式为<sup>[15]</sup>:

$$\sigma_{lg} V_m^{2/3} = k(T_c - T)$$

式中  $\sigma_{lg}$  为表面张力;  $V_m$  为液体摩尔体积;  $k$  为普适常数;  $T_c$  为临界常数, 即表面张力趋于 0 的温度, 液-气相界面消失, 液态与气态无法区分的温度。

由此可知, 在  $T_c$  以下, 液相的表面张力  $\sigma_{lg}$  随温度的升高而下降。

$\sigma_{lg}$  降低导致润湿角降低, 这有利于固相与液相之间的润湿, 提高接头的连接质量。因此, 在 940 °C 以下时, 随着焊接温度升高, 钎料的润湿性能提高, 焊接接头强度升高。但如果焊接温度过高, 除了会引起母材与钎料的氧化外, 还会使母材晶粒长大, 或者局部变形, 产生焊接应力, 使焊接接头强度降低。

### 2.3.2 保温时间的影响

图8所示为焊接温度为940℃,以Cu-10%Sn为焊接钎料,FeAl多孔材料与不锈钢焊接的抗拉强度随保温时间的变化曲线。由图8可知,随着焊接保温时间从5 min 延长到15 min, FeAl多孔材料与不锈钢焊接后的抗拉强度逐渐增大,当焊接保温时间为15 min时达到最大值;当保温时间超过15 min时, FeAl多孔材料与不锈钢焊接强度下降。

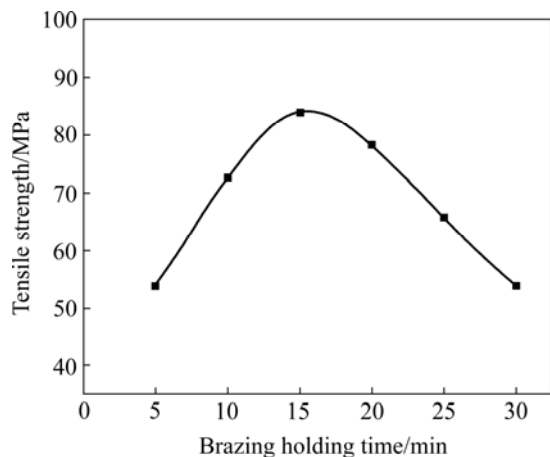


图8 保温时间对 FeAl 多孔材料与不锈钢焊接抗拉强度的影响

Fig.8 Effect of brazing holding time on tensile strength of welded FeAl porous material and stainless steel

从热力学观点来看,由于液固界面两侧有浓度梯度存在,在扩散驱动力作用下,钎料层与两边母体材料相互扩散。保温时间决定扩散程度,保温时间较短时,原子来不及进行扩散或扩散不充分,不能形成结合良好的接头。另外,由于钎料是粉末混合压坯,在随温度升高的过程中,Cu和Sn向焊接母体扩散的同时也会发生反应,保温时间较短时,Cu和Sn自身的反应不充分,导致焊缝组织不均匀,力学性能下降。延长保温时间有利于Cu和Sn的充分扩散和反应,获得较牢固的焊缝,进而使抗拉强度提高。但若保温时间过长,则液相量存在时间较长,容易产生钎料流失现象,导致焊缝中出现孔洞,接头强度大大降低。

## 3 结论

1) 采用 Cu-Sn 混合粉末压坯为钎料可以实现 FeAl 多孔材料和 434L 不锈钢的焊接,且钎料成分对焊接后抗拉强度的影响十分显著。Cu-25%Sn 作为钎

料焊接后得到的焊缝成分为铜锡金属间化合物,焊接后抗拉强度为 46.9 MPa; Cu-10%Sn 作为钎料焊接后得到的焊缝成分为铜锡固溶体,焊接后抗拉强度为 83.9 MPa。

2) FeAl 多孔材料和 434L 不锈钢的焊接对真空钎焊工艺参数非常敏感。采用 Cu-10%Sn 为钎料,经过 940℃保温 15 min 焊接后,得到的焊后抗拉强度为 83.9 MPa,可达 FeAl 多孔材料母体抗拉强度的 90.6%。其焊接机理为液态钎料对被焊母体的粘结连接及钎料元素与被焊母体元素间的互扩散与反应。

## REFERENCES

- [1] LEE Y L, SHIUE R K, WU S K. The microstructural evolution of infrared brazed Fe<sub>3</sub>Al by BNi-2 braze alloy[J]. *Intermetallics*, 2003, 11: 187-195.
- [2] SHIUE R K, WU S K, LEE Y L. Transient microstructural evolution of infrared brazed Fe<sub>3</sub>Al intermetallics using aluminum foil[J]. *Intermetallics*, 2005, 13: 818-826.
- [3] LIU C T, SERINGER J, MUNDY J N, HORTON L L, ANGELINI P. Ordered intermetallic alloys: An assessment [J]. *Intermetallics*, 1997, 5: 579-596.
- [4] 张伟伟,夏明生,徐道荣,秦琳. Fe<sub>3</sub>Al 基合金焊接问题的研究现状[J]. *焊接技术*, 2004, 33(4): 6-8.  
ZHANG Wei-wei, XIA Ming-sheng, XU Dao-rong, QIN Lin. Current research status of welding of Fe<sub>3</sub>Al-based alloys[J]. *Welding Technology*, 2004, 33(4): 6-8.
- [5] 张伟伟,徐道荣,夏明生. Fe<sub>3</sub>Al 合金的钎焊性能试验研究[J]. *试验与研究*, 2005, 34(2): 17-19.  
ZHANG Wei-wei, XU Dao-rong, XIA Ming-sheng. Research on brazability of Fe<sub>3</sub>Al alloys[J]. *Welding Technology*, 2005, 34(2): 17-19.
- [6] GAO D C, YANG W Y, DONG M, HUANG J H, HUANG Y D, SUN Z Q. GTA welds of iron-aluminide based alloy[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2001, 8(1): 39-42.
- [7] WANG J, LI Y J, LIU P, WU H Q. Microstructure and performance in diffusion-welded joints of Fe<sub>3</sub>Al/Q235 carbon steel[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 145: 294-298.
- [8] TORUN O, GÜRLER R, BALSAN B, CELIKYÜREK I. Diffusion bonding of iron aluminide Fe<sub>72</sub>Al<sub>28</sub> using a pure iron interlayer[J]. *Intermetallics*, 2005, 13: 801-804.
- [9] GAO H Y, HE Y H, SHEN P Z, XU N P, ZOU J, JIANG Y, LIU C T. Effect of heating rate on the pore structure of FeAl porous alloy[J]. *Powder Metallurgy*, 2008, 51(2): 171-175.
- [10] HE Y H, JIANG Y, XU N P, ZOU J, HUANG B Y, LIU C T,

- LIAW P K. Fabrication of Ti-Al micro/nanometer-sized porous alloys through the Kirkendall effect[J]. *Advanced Materials*, 2007, 19: 2102–2106.
- [11] 高海燕, 贺跃辉, 沈培智, 江 垚, 黄伯云, 徐南平. FeAl 金属间化合物多孔材料的制备[J]. *材料研究学报*, 2008, 22(5): 486–489.
- GAO Hai-yan, HE Yue-hui, SHEN Pei-zhi, JIANG Yao, HUANG Bai-yun, XU Nan-ping. Preparation of FeAl porous material[J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 2008, 22(5): 486–489.
- [12] YAO J, HE Y H, XU N P, ZOU J, HUANG B Y, LIU C T. Effect of the Al content on pore structures of porous Ti-Al alloys[J]. *Intermetallics*, 2008, 16: 327–332.
- [13] BROCHU M, PUGH M, DREW R A L. Wetting behaviour of copper on an iron aluminide alloy[J]. *Intermetallics*, 2004, 12: 289–294.
- [14] 黄培云. 粉末冶金原理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1997: 318–319.
- HUANG Pei-yun. *Theory of powder metallurgy*[M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 1997: 318–319.
- [15] 邹家生. 材料连接原理与工艺[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2005: 12–13.
- ZOU Jia-sheng. *Theory and technology of materials joint*[M]. Harbin: Harbin Industry University Press, 2005: 12–13.

(编辑 龙怀中)