

# 几种高温钎料对 C/C 复合材料的润湿性研究

Wettability of Several High-temperature Brazing Fillers on C/C Composites

陈 波, 熊华平, 毛 唯, 李晓红  
(北京航空材料研究院, 北京 100095)

CHEN Bo, XIONG Hua-ping, MAO Wei, LI Xiao-hong  
(Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

**摘要:** 采用座滴法测试了 10 种钎料对 C/C 母材的润湿性。实验结果表明: 随着活性元素 Ti, Cr, V 含量的提高, 钎料润湿性逐渐改善。在  $\text{Co-Ti}$  和  $\text{Ni-Ti}$  钎料体系中, Ti 元素的存在形式对钎料润湿性影响很大, Ti 以固溶体形式存在, 易于向 C/C 母材偏聚发生反应, 从而提高润湿性, 且润湿界面附近的 Ti 和 C 主要以 TiC 形式存在。采用  $\text{PdNi-Cr-V-Si-B}$  钎料的润湿界面中, 活性元素 Cr 和 V 存在于扩散反应层中, 推断 Cr 主要以  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  形式存在, 而 V 以  $\text{V}_2\text{C}$  形式存在。当 Cr 和 V 同时加入钎料中, Cr 向界面反应层扩散的倾向更明显。

**关键词:** 高温钎料; C/C 复合材料; 钎焊; 润湿性

中图分类号: TG425 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2008)01-0025-05

**Abstract:** The wettability of ten kinds of brazing fillers on C/C composite was studied with the sessile drop method. The results showed that the wettability of the brazing fillers on C/C composites was improved with the increase of the content of active elements Ti, Cr or V. In the  $\text{Co-Ti}$  and  $\text{Ni-Ti}$  brazing fillers system, the form of the element Ti had an effect on the wettability. When the element Ti existed with solid solution, it tended to react with C/C composite to improve the wettability. The elements Ti and C reacted and formed TiC compound. The active elements Cr, V distributed at the interface between C/C composite and  $\text{PdNi-Cr-V-Si-B}$  brazing filler and formed  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  phase and  $\text{V}_2\text{C}$  phase respectively. When the elements Cr, V were added concurrently in the brazing filler, the former diffused to the reaction layer more strongly than the latter.

**Key words:** high-temperature brazing filler; C/C composite; brazing; wettability

C/C 复合材料是一种 C 纤维增强 C 基体的复合材料, 具有高温强度高、抗热冲击性能好、密度小、热膨胀系数低、耐腐蚀、吸震性好、摩擦性好等一系列优异性能, 既可作为功能材料, 又可作为高温结构材料, 在航空航天应用上具有很好的发展前景<sup>[1]</sup>。

由于 C 的熔点很高, 因此很难利用熔焊方法进行焊接, 一般采用钎焊和扩散焊方法进行焊接。C/C 复合材料一般工作于特殊的工作环境中, 焊接结构需要满足这些环境条件下的特殊要求, 因此在连接过程中最大的问题是能否保持 C/C 复合材料原有的特性不受焊接过程的破坏, 以及焊接接头能否在工作环境中保持稳定。钎焊需要的温度相对较低, 而且适合复杂构件的连接, 是一种优选的连接方法<sup>[2, 3]</sup>。

目前, 国内外针对 C/C 复合材料连接的报道相对较少, 多数报道是采用添加中间层的扩散焊方法, 这种

方法加热温度很高, 不适合该材料与金属的连接。关于 C/C 复合材料与金属的连接一般采用钎焊方法, 目前在钎料选取上基本只局限于 Cu 基<sup>[4]</sup>、AgCu 基<sup>[5]</sup>和 Ti 基<sup>[6]</sup>钎料, 但这些接头的高温强度受钎料性能影响, 其工作温度一般不超过 500℃。为了更好发挥 C/C 复合材料的高温性能以及满足更高温度的使用要求, 有必要研究 C/C 复合材料与高温合金的连接。根据报道, 一些学者采用了 Si,  $\text{Mg}_2\text{Si}$ <sup>[7]</sup>,  $\text{TiSi}_2$ <sup>[8]</sup> 等钎料实现了 C/C 复合材料自身的钎焊连接, 但连接温度高达 1420~1490℃, 这显然不适于 C/C 复合材料与高温合金的连接。因此, 研究 C/C 复合材料与高温合金连接用的高温钎料显得十分重要。

本工作分别选取 Ti, Cr, V 为活性元素, 共设计了 10 种成分的高温钎料, 进行了 C/C 复合材料的润湿性研究。

1 实验材料及方法

实验用母材为三维正交增强型(3D 型)C/C 复合材料,其密度为 2.0g/cm<sup>3</sup>。设计了 10 种成分(质量分数/%)高温钎料,分别为:1<sup>#</sup>:Co-20Ti,2<sup>#</sup>:Co-73Ti,3<sup>#</sup>:Ni-34Ti,4<sup>#</sup>:Ni-71Ti,5<sup>#</sup>:Pd-40Ni,6<sup>#</sup>:PdNi-(2~6.5)V,7<sup>#</sup>:PdNi-(6.6~14.5)V,8<sup>#</sup>:PdNi-(4~11)Cr,9<sup>#</sup>:PdNi-(12~25)Cr,10<sup>#</sup>:PdNi-(12~25)Cr-(6.6~14.5)V-Si-B,其中 1<sup>#</sup>~9<sup>#</sup>钎料为纯金属混合粉,10<sup>#</sup>钎料为急冷态箔带。实验前将 C/C 复合材料母材试片用细砂纸打磨至表面光亮,然后置于丙酮中进行超声清洗;1<sup>#</sup>~9<sup>#</sup>钎料粉经精细模具压制成为直径为 4mm 的圆柱状坯体,放置在清洗后的母材试片中央,10<sup>#</sup>钎料片(厚度为 60~70μm)裁成小块叠加 5~6 层放置在母材试片中央。润湿实验过程中,加热速率为 10℃/min,热态真空度不低于 5×10<sup>-3</sup>Pa,保温结束后以 5℃/min 的冷却速率冷却至室温。

通过扫描电镜(SEM)和 X 射线能谱仪观察润湿试样横断面微观组织形貌,分析相应的元素面分布以及界面某些微区的成分。

2 结果与讨论

1<sup>#</sup>~4<sup>#</sup>钎料分别选择了 Co-Ti 和 Ni-Ti 的共晶点成分,5<sup>#</sup>~10<sup>#</sup>钎料以 Pd-Ni 最低液相温度对应的固溶体成分为基础,不添加或少量添加活性元素 V 和 Cr 配置而成,其中 10<sup>#</sup>钎料还加入了少量的 Si 与 B 元素,目的是适当降低钎料熔点,便于制成急冷态箔带。表 1 给出了采用座滴法测得的 10 种钎料润湿结果,从表 1 可以看出,钎料中随着活性元素(Ti, Cr, V)含量的提高,钎料的润湿性有很大改善,如 2<sup>#</sup> 优于 1<sup>#</sup>,4<sup>#</sup> 优于 3<sup>#</sup>,7<sup>#</sup> 优于 6<sup>#</sup>,9<sup>#</sup> 优于 8<sup>#</sup>,但个别铺展较好的钎料(如 2<sup>#</sup>,4<sup>#</sup>)其边缘与母材之间界面裂开。

图 1a~d 分别为采用 1<sup>#</sup>~4<sup>#</sup>钎料获得的润湿试

表 1 10 种钎料成分及润湿情况  
Table 1 Compositions and experimental results of ten kinds of brazing fillers with the sessile drop method

No	Mass fraction / %	Heating condition	Contact angle / (°)	Remark
1 <sup>#</sup>	Co-20Ti	1220℃/10min	95	-
2 <sup>#</sup>	Co-73Ti	1220℃/10min	4	Good wettability but cracking
3 <sup>#</sup>	Ni-34Ti	1220℃/10min	88	-
4 <sup>#</sup>	Ni-71Ti	1220℃/10min	8	Good wettability but cracking
5 <sup>#</sup>	Pd-40Ni	1250℃/30min	69	-
6 <sup>#</sup>	PdNi-(2-6.5)V	1250℃/30min	73	-
7 <sup>#</sup>	PdNi-(6.6-14.5)V	1250℃/30min	39	Excellent wettability
8 <sup>#</sup>	PdNi-(4-11)Cr	1250℃/30min	75	-
9 <sup>#</sup>	PdNi-(12-25)Cr	1250℃/30min	1	Excellent wettability
10 <sup>#</sup>	PdNi-(12-25)Cr-(6.6-14.5)V-Si-B	1250℃/30min	1	Excellent wettability

样,从这 4 种钎料的润湿结果可以看出,含 Ti 量低的 Co-20Ti 和 Ni-34Ti 在 C/C 复合材料母材上凝集成小球,未润湿;含 Ti 量高的 Co-73Ti 和 Ni-71Ti 润湿铺展较好。陆善平等人<sup>[9]</sup>采用两种 Co-Ti 共晶成分钎料在 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 上得到的润湿结果与本实验中的研究结果类似,Co-20Ti 凝集成小球,Co-73Ti 铺展良好。分析认为,钎料的润湿性与钎料中活性组元存在状态密切相关,当活性组元在钎料中以稳定化合物形式存在时,因失去活性作用而很难向母材偏聚反应;当活性组元以自由状态或固溶体方式存在时,有利于向母材偏聚反应,降低界面能,从而润湿母材。本实验选用的 Co-Ti 和 Ni-Ti 钎料中当 Ti 含量高时,多余的 Ti 以固溶体形式存在,易于向 C/C 母材偏聚发生反应,从而提高

润湿性。图 1e~j 分别为 5<sup>#</sup>~10<sup>#</sup>钎料的润湿铺展结果,不含或含少量活性元素的钎料(如图 1e, f, h)在 C/C 母材上凝集成小球,且小球与母材剥离;活性元素含量相对较多的钎料(如图 1g, i, j)润湿铺展较好,表面白亮。

图 2 给出了 Co-73Ti 钎料润湿界面组织的背散射照片,从图 2 可以看出钎料基体主要呈现共晶组织形貌,钎料与 C/C 基体间未出现明显过渡反应层。通过界面附近区域能谱分析结果来看,该区域(图 2 中“1”区)主要由 C 和 Ti 两种元素组成(见表 2 中“1”)。高温下 C 与钎料中固溶的 Ti 发生反应:C+Ti=TiC,在本实验 1220℃规范下,该反应式中 TiC 形成的自由能 ΔG≈-130kJ/mol<sup>[10]</sup>,Ti-C 化合物主要以 TiC 形

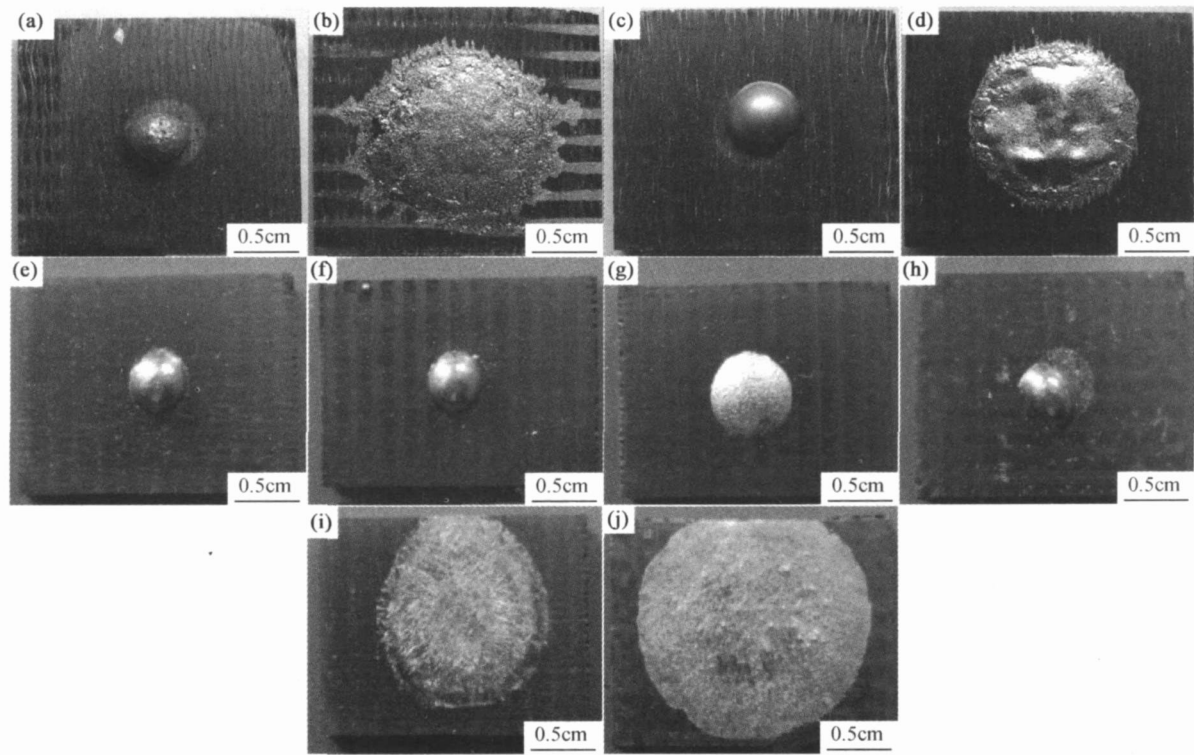


图 1 10 种钎料润湿实物照片

(a) Co-20Ti; (b) Co-73Ti; (c) Ni-34Ti; (d) Ni-71Ti; (e) Pd-40Ni; (f) PdNi-(2-6 5) V; (g) PdNi-(6 6-14 5) V;  
(h) PdNi-(4-11) Cr; (i) PdNi-(12-25) Cr; (j) PdNi-(12-25) Cr-(6 6-14 5) V-Si-B

Fig 1 Morphologies of ten kinds of brazing fillers on C/C composites with the sessile drop method

(a) Co-20Ti; (b) Co-73Ti; (c) Ni-34Ti; (d) Ni-71Ti; (e) Pd-40Ni; (f) PdNi-(2-6 5) V; (g) PdNi-(6 6-14 5) V;  
(h) PdNi-(4-11) Cr; (i) PdNi-(12-25) Cr; (j) PdNi-(12-25) Cr-(6 6-14 5) V-Si-B

表 2 采用 Co-73Ti 钎料的润湿界面特征区域成分

Table 2 Composition of special zones in joint using Co-73Ti brazing filler

Position	Atom fraction/ %	
	C	Ti
1	71.01	28.99

润湿界面中未出现明显的过渡反应层, 母材与钎料之间形成了锯齿状结合界面; PdNi-(6 6~ 14. 5) V 钎料的润湿界面中出现了厚度约为 5~ 10μm 的扩散反应层(图 3b 中“1”区), 该区成分主要以 C 和 V 为主(表 3 中“1”), 形成了富 C 的 V-C 化合物; PdNi-(12~ 25) Cr 钎料获得的润湿界面组织类似 PdNi-(6 6~ 14. 5) V 钎料的界面, 形成了扩散反应层(图 3c 中“2”区), 该层的厚度约为 5~ 15μm, 但不同的是有些区域的反应层灰色组织呈块状向钎料中漂移, 说明 Cr 加入钎料中很大程度上增加了钎料的活性, 反应层元素分布及微区 XEDS 分析结果(表 3 中“2”)表明, 该区域主要以含 C 和 Cr 为主, 形成了 Cr-C 化合物; PdNi-(12~ 25) Cr-(6 6~ 14. 5) V-Si-B 钎料的界面区出现了灰色(图 3d

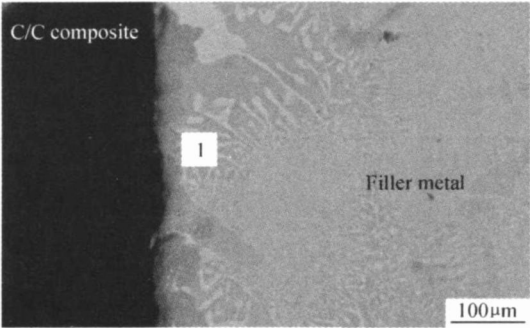


图 2 Co-73Ti 钎料与 C/C 复合材料润湿界面的背散射电子像

Fig 2 Back-scattered electron image of interface between Co-73Ti and C/C composites

式存在, 多余的 C 富集在 TiC 基体中。但是生成的 TiC 与 C/C 复合材料热膨胀系数不匹配, 导致钎料与母材结合的边缘处开裂, 所以 Ni-Ti, Co-Ti 不宜作为钎焊 C/C 复合材料的钎料。

图 3 分别给出了 Pd-40Ni, PdNi-(6. 6~ 14. 5) V, PdNi-(12~ 25) Cr 和 PdNi-(12~ 25) Cr-(6 6~ 14. 5) V-Si-B 四种钎料的背散射照片, 其中 Pd-40Ni 钎料的

中“3”区)和灰黑色(图 3d 中“4”区)两个反应层,前者厚度约为 3~5 $\mu\text{m}$ ,Cr,C 含量相对较高(见表 3 中“3”),后者厚度约为 10~15 $\mu\text{m}$ ,其 V,C 含量相对较高(表 3 中“4”)。

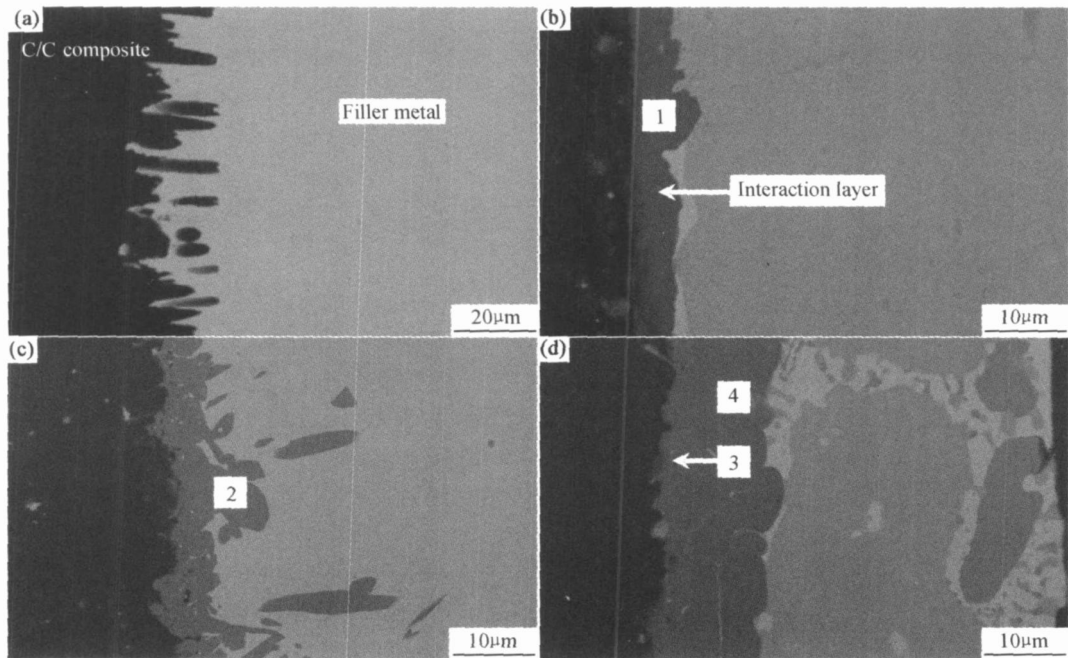


图 3 四种 Pd-Ni 基钎料与 C/C 复合材料润湿界面的背散射电子像  
(a) Pd-40Ni/C/C; (b) PdNi-(6~14~5)V/C/C; (c) PdNi-(12~25)Cr/C/C;  
(d) PdNi-(12~25)Cr-(6~14~5)V-SiB/C/C

Fig 3 Back-scattered electron images of the interface using four kinds of Pd-Ni based-brazing filler for C/C composites (a) Pd-40Ni/C/C; (b) PdNi-(6~14~5)V/C/C; (c) PdNi-(12~25)Cr/C/C; (d) PdNi-(12~25)Cr-(6~14~5)V-SiB/C/C

表 3 四种 Pd-Ni 基钎料与 C/C 复合材料润湿界面的特征区域成分

Table 3 Composition of typical zones at the interface between C/C composites and four kinds of Pd-Ni based-brazing fillers

Position	Atom fraction/ %					
	C	V	Cr	Ni	Pd	Total
1	85.78	14.06	—	—	—	99.84
2	44.65	—	54.57	0.43	—	99.65
3	65.10	8.02	22.56	—	—	95.68
4	63.46	19.95	9.42	—	—	92.83

图 4 为 PdNi-(12~25)Cr-(6~14~5)V-SiB 钎料获得润湿界面的元素面分布,可以看出,钎料基体区主要含 Pd 和 Ni,其中 Pd 主要分布在亮白区域内,Ni 分布在颜色暗一些的区域内,两者在扩散反应层中分布较少;Cr 和 V 主要分布在扩散反应层中,Cr 在靠近母材的灰色区(对应图 3d 中“3”)中分布明显,而 V 在反应层中灰黑色区域(对应图 3d 中“4”)相对分布较多,从这两种元素分布的特征来看,Cr 和 V 的同时加入,Cr 向界面反应层扩散的倾向更明显。

活性元素 Cr 或 V 的加入,促进了钎料与母材的反应,使得钎料的润湿性获得很大改善。Ting C Chou 等人<sup>[11]</sup>系统研究了 SiC 中 C 与 Cr 的作用机理,指出 Cr-C 相包括 4 种类型,分别是 Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>,Cr<sub>4</sub>C,Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>和 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>,从热力学角度来看,这 4 种化合物在 1127℃下的自由能分别为-460,-96,-70,-12 kJ/mol,所以接头中存在的 Cr-C 相应优先生成 Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>。本实验中 C/C 复合材料母材与钎料中 Cr 的作用机理类似,结合润湿界面特征区域成分(表 3 中“2”,“3”和“4”),推

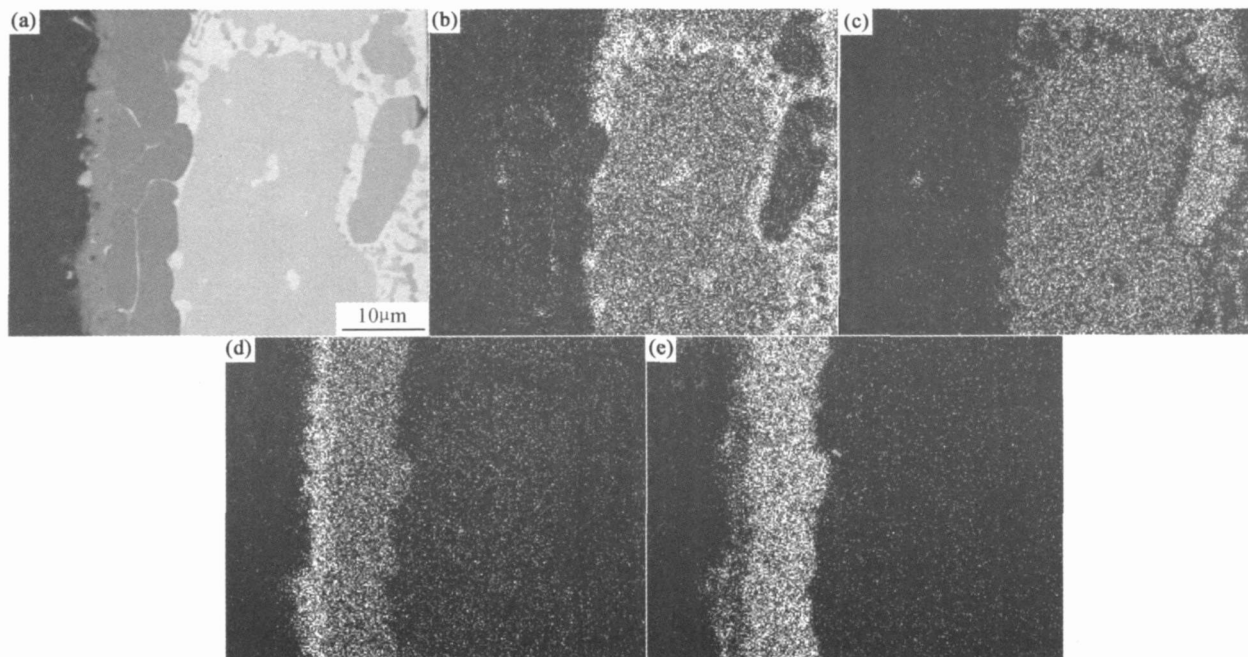


图4 PdNi-(12~25)Cr-(6~14~5)V-Si-B 与 C/C 复合材料润湿界面的背散射电子像(a) 及元素面分布 Pd (b), Ni (c), Cr (d) 与 V (e)

Fig. 4 Back-scattered electron image of the interface using PdNi-(12-25)Cr-(6-14-5)V-Si-B brazing filler on C/C composite (a) and area distribution images of elements Pd (b), Ni (c), Cr (d) and V (e)

断在界面的扩散反应层中(图3中的“2”,“3”和“4”) Cr-C 相同样以化合物  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  形式存在。根据 I Gotman 等人<sup>[12]</sup> 的研究结果,润湿界面中 V-C 相主要以  $\text{V}_2\text{C}$  形式存在(见表3中“1”,“3”和“4”)。由于 Pd 和 Ni 无限互溶,所以钎料基体区主要为 Pd-Ni 固溶体为主。PdNi-Cr-V 系钎料对 C/C 复合材料实际连接实验还有待于进一步研究。

### 3 结论

(1) 选取 10 种钎料对 C/C 母材进行润湿铺展实验,结果表明随着活性元素 Ti, Cr, V 含量的提高,钎料润湿性逐渐改善。

(2) 在 Co-Ti 和 Ni-Ti 钎料体系中, Ti 元素的存在形式对钎料润湿性影响很大, Ti 以固溶体形式存在,易于向 C/C 母材偏聚发生反应,从而提高润湿性,且润湿界面中 Ti 和 C 主要以  $\text{TiC}$  形式存在。但是生成的  $\text{TiC}$  与 C/C 复合材料热膨胀系数不匹配,导致钎料与母材结合的边缘处开裂,所以 Ni-Ti, Co-Ti 不宜作为钎焊 C/C 复合材料的钎料。

(3) Pd-Ni 基钎料的润湿界面中,活性元素 Cr 和 V 主要存在于扩散反应层中,推断 Cr 以  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  形式存在, V 以  $\text{V}_2\text{C}$  形式存在。当 Cr 和 V 同时添加时, Cr 向界面反应层扩散的倾向更明显。

### 参考文献

- [1] 尹健,熊翔,张红波,等. 固体火箭发动机喷管用 C/C 复合材料的研究进展[J]. 材料导报, 2004, 18(4): 46-48.
- [2] 席琛,李贺军,张秀莲. 碳/碳复合材料连接工艺的研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2003, (2): 19-21.
- [3] 陈俊华,耿浩然,陈广立,等. 碳/碳复合材料焊接技术研究进展[J]. 热加工工艺, 2006, 35(11): 75-78.
- [4] SINGH M, SHPARGEL T P, MORSCHER G N, et al. Active metal brazing and characterization of brazed joints in titanium to carbon-carbon composites[J]. Materials Science and Engineering, 2005, A412: 123-128.
- [5] 马文利,毛唯,李晓红,等. 采用银基活性钎料钎焊碳/碳复合材料[J]. 材料工程, 2002, (1): 9-11.
- [6] CANONICO D A, COLE N C, SLAUGHTER G M. Direct brazing of ceramics, graphite and refractory metals[J]. Welding Journal, 1977, (8): 31-38.
- [7] MILENA SALVO, PATRICK LEMOINE, MONICA FERRARIS, et al. Joining of carbon-carbon composites for therm onuclear fusion applications[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1997, 80(1): 206-212.
- [8] PARVIZ DADRAS, THOMAS T NGAI, GOPAL M MEHROTRA. Joining of carbon-carbon composites using boron and titanium disilicide interlayers[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1997, 80(1): 125-132.

(下转第 37 页)

严重的应力集中,进入塑性形变阶段后,由于发生应力松弛,材料内部的应力水平也不会太高,因此2号试样对应的 $Hd$ 一直处于较低水平。对于1号和3号试样 $Hd$ 水平存在差异的现象,是因为3号试件总体尺寸小于1号而厚度大于1号,裂纹尺寸相同的情况下,3号试件内部应力集中就更为严重,试件的残余应力水平与1号相比要高得多,因此3号试件的 $Hd$ 的水平相对1号就会更高一些<sup>[6,7]</sup>。

4 实验例证

作者对某焊接钢管厂“西气东输”工程用X70钢管的焊缝部位进行了检测,被检测钢管的具体尺寸如表5所示。

表5 检测钢管的工艺参数

Table 5 Parameters of inspected pipeline

Material	External diameter/mm	Length/m	Wall thickness/mm	Specification
X70	268	500	7	API SPEC 5L

现场共检测焊缝30条,对利用上述实验建立的 $Hd$ 阈值作了预测,得出其中12条焊缝有焊接裂纹存在,其磁记忆信号对应的 $Hd$ 值均大于 $50A/m$ 。随后采用CTS-26A型超声波探伤仪对上述焊缝进行了对比检测。检测结果表明,上述12条焊缝均存在焊接裂纹,而超声检测未发现裂纹等缺陷的焊缝,其MMM信号对应的 $Hd$ 水平均在 $50A/m$ 以下,与磁记忆信号特征分析结果一致,这进一步说明利用小波分解后第一尺度分量FFT变换幅度峰值 $Hd$ 来实现焊接裂纹等缺陷的识别诊断是可行的。

5 结论

(1) 采用Daubieches小波对MMM信号进行多

分辨分析,对小波4尺度分解后第一尺度上分量信号进行快速傅里叶变换,发现变换后幅度最大峰值 $Hd$ 大于阈值 $50A/m$ 时,有裂纹等缺陷存在。利用该特征可以实现裂纹等缺陷的识别。

(2) 信号经小波分解后第一尺度分量FFT变换后幅度特性最大峰值 $Hd$ 的水平与材料内部残余应力水平有关,当应力水平增加时, $Hd$ 值也相应地增大。

参考文献

[1] 任吉林,林俊明,池永滨,等.金属磁记忆技术[M].北京:电力出版社,2000.

[2] DUBOV A. Principle features of metal magnetic memory method and inspection tools as compared to known magnetic NDT methods[J]. CINDE Journal, 2006, 27(3): 16- 20.

[3] YAMASAKI T, YAMAMOTO S, HIRAO M. Effect of applied stresses on magnetostriction of low carbon steel[J]. NDT & E International, 1996, 29(5): 263- 268.

[4] DOUBOV A A. About physical base of method of metal magnetic memory[A]. 8th ECNDT Proceedings[C]. Spain: Barcelona, 2002.

[5] HUANG Song-ling, LI Lu-ming, SHI Ke-ren, et al. Magnetic field properties caused by stress concentration[J]. Journal of Central South University of Technology, 2004, 11(1): 23- 26.

[6] 邱新杰. 焊接裂纹的金属磁记忆漏磁场特性的初步研究[D]. 天津: 天津大学材料科学与工程学院, 2004.

[7] 严春妍. 焊接裂纹的金属磁记忆信号特征判据的研究[D]. 天津: 天津大学材料科学与工程学院, 2005.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50475113); 高等学校博士学科点专项基金资助项目(20030056002)

收稿日期: 2007-03-14; 修订日期: 2007-11-14

作者简介: 严春妍(1982—), 女, 博士研究生, 从事金属磁记忆检测和金属焊接性的研究. 联系地址: 天津大学材料学院材料加工工程7号信箱(300072)。E-mail: yanchunyan1982@126.com

(上接第29页)

[9] 陆善平, 董秀中, 吴庆, 等.  $Cu-Ti, Ti+Zr-Cu$  高温钎料在  $Si_3N_4$  陶瓷上润湿性与界面连接[J]. 材料研究学报, 1998, 12(3): 295- 298.

[10] PARK J S, LANDRY K, PEREPEZKO J H. Kinetic control of silicon carbide/metal reactions[J]. Materials Science and Engineering, 1999, A259: 279- 286.

[11] TING C CHOU, ANNE JOSHI. Selectivity of silicon carbide/stainless steel solid-state reaction and discontinuous decomposition of silicon carbide[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1991, 74(6): 1364- 1372.

[12] GOTMAN I, GUTMANASE Y. Microstructure and thermal stability of coated  $Si_3N_4$  and  $SiC$ [J]. Acta Metall Mater, 1992, 40: 121- 131.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59905022, 50475160)

收稿日期: 2007-05-18; 修订日期: 2007-10-22

作者简介: 陈波(1979—), 男, 硕士, 主要从事航空新材料的连接研究. 联系地址: 北京81信箱20分箱(100095)。E-mail: chenb981621@163.com