

⑨1269-1274

# Ni-Fe-Cr-Ti 及 Co-Ni-Fe-Cr-Ti(Si, B) 系高温钎料 对 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 陶瓷的润湿与界面连接\*

熊华平 程耀永 毛唯 郭万林 李晓红 谢永慧 潘辉  
(北京航空材料研究院焊接与锻压工艺研究室, 北京 100095)

**摘要** 采用座滴法研究了 Ni-Fe-Cr-(14—29)Ti(质量分数, %, 下同)合金在 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 陶瓷上的润湿行为. 结果表明, 在 1493 K, 10 min 的真空加热条件下, 随着含 Ti 量的增加, 合金的润湿性逐渐改善, 含 Ti 量为 24%—29% 时合金的润湿角达到 27.3°. 微观分析表明, 钎料中的元素 Cr 向 Ni-Fe-Cr-(24—29)Ti/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 界面区扩散和富集, 生成了复杂的 Cr-Ni-Fe-Si 四元化合物. 分析了 Ti 元素含量的增加对于合金润湿性改善的原因. 合金中加入元素 Co 并降低 Ni 含量可增强 Ti, Cr 的活性, 导致形成不同的界面反应产物并对合金润湿能力及界面结合能力产生重要影响. 成分调整后的 Co-Ni-Fe-Cr-(14—20)Ti 合金对 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的润湿角可达到 20.0°, 形成牢固的润湿界面

**关键词** Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, 润湿, 高温钎料, 界面反应  
**中图分类号** TG425, TG40 **文献标识码** A **文章编号** 0412-1961(2000)12-1269-06

Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 陶瓷

TQ174.1  
TG425

## WETTING OF Ni-Fe-Cr-Ti AND Co-Ni-Fe-Cr-Ti(Si, B) SYSTEM BRAZING FILLERS ON Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> CERAMIC AND INTERFACIAL BONDING

XIONG Huaping, CHENG Yaoyong, MAO Wei, GUO Wanlin, LI Xiaohong, XIE Yonghui, PAN Hui  
Welding and Forging Laboratory, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095  
Correspondent: XIONG Huaping, senior engineer, Tel: (010)62458113(O),  
E-mail: huaping.xiong@biam.ac.cn  
Manuscript received 2000-06-19, in revised form 2000-08-28

**ABSTRACT** The wetting behavior of Ni-Fe-Cr-(14—29)Ti (mass fraction, %) alloys on Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> was studied by the sessile drop method. The results show that on the condition heating at 1493 K for 10 min in vacuum, the alloy's wettability on Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> is improved by increasing the Ti content. When the Ti content is high up to 24%—29 %, the corresponding wetting angle reaches 27.3°. The element Cr accumulated at the interface of Ni-Fe-Cr-(24—29)Ti alloy/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> and a complex quaternary compound of Cr-Ni-Fe-Si formed. The reasons of the improvement of wettability by Ti addition were analysed. The activities of the elements Ti and Cr can be increased by replacing Ni with Co in the Ni-Fe-Cr-Ti alloys. The composition change resulted in different transition structures composed of layered interfacial reaction products, which have remarkable effects on the wettability and the interfacial bonding. After the composition adjustment, the wetting angle of the Co-Ni-Fe-Cr-(14—20)Ti alloy on the Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> reached 20.0°, and the strong bonding between the Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> and the brazing filler was obtained.

**KEY WORDS** Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, wetting, high-temperature brazing filler, interfacial reaction

Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 陶瓷是一种很有前途的工程结构陶瓷材料, 它的研究和开发已日益受到重视. 在实际应用中, 有必要对

陶瓷与陶瓷、陶瓷与金属进行可靠的连接. 钎焊作为一种可靠的连接方法获得了广泛的研究, 但在 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 陶瓷的连接研究中, 较多地使用传统的 Ag-Cu-Ti 活性钎料, 该合金不仅价格较贵, 而且焊后的工作温度不能超过 500 °C. 使用其它钎料如 Al, Al-4Cu, Al-10Si 合金<sup>[1,2]</sup>, 以及 Cu-Ti 系合金钎料<sup>[3]</sup> 等获得的 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 接头的高温性能更差. 为充分发挥结构陶瓷的高温性能, 有必要研

\* 国家自然科学基金资助项目 59905022  
收到初稿日期: 2000-06-19, 收到修改稿日期: 2000-08-28  
作者简介: 熊华平, 男, 1969 年生, 高级工程师, 博士

制新型钎焊陶瓷用高温钎料。

国外在研究钎焊陶瓷用高温钎料中,较多地设计含有贵金属或以贵金属 Au, Pd, Pt, Ag-Pd 为基的钎料成分,研究目标是使钎焊后接头能在 650 ℃ 或更高的温度下工作<sup>[4-6]</sup>,到目前为止获得最好结果的是 41Ni-34Cr-25Pd 和 Au-(33—35)Ni-(3—4.5)Cr-(1—2) Fe-(1—2)Mo 两种钎料,使用前一种钎料获得的 Sialon/Sialon 连接接头弯曲强度从室温至 700 ℃ 可一直稳定在 300 MPa 以上<sup>[4]</sup>,这种钎料存在的问题是不能直接钎焊陶瓷,它对 Sialon 陶瓷的润湿与连接依赖于焊前在 Sialon 陶瓷表面喷上一层均匀的碳膜,另外该钎料中含有贵金属 Pd,使用后一种钎料钎焊 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Incoloy909 (Fe 基低膨胀合金),获得的接头在 650 ℃ 温度下强度值较高,且比起室温只是略有下降<sup>[5]</sup>,但该合金钎料中的主要元素是 Au,价格更加昂贵,很难推广,国内也已经开始了高温钎料的探索性研究,取得一些进展,但对于有关 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 陶瓷的连接目前还未获得满意的结果,研究的 Ni-Cr-Si-Ti<sup>[7]</sup>, Ni-Ti<sup>[8]</sup> 及 Co-Ti<sup>[9]</sup> 系合金钎料,由于活性元素 Ti 与钎料中的基本元素 Ni 或 Co 易于形成稳定的化合物而降低 Ti 的活性,提高 Ti 的含量又容易造成钎料的极大脆性,因此直接使用这些钎料难以实现对 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 陶瓷的牢固连接,文献 [10] 研究了 Ni 基合金 Ni-Fe-Cr-Ti(Si, B) 对 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷的润湿性,但该体系合金对 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 陶瓷的润湿及连接研究还未见报道,此外, Fe-Ti 系合金钎料也被用于 SiC 陶瓷的连接<sup>[11]</sup>,而它对 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 陶瓷的连接还未作尝试。

本文设计了 Ni-Fe-Cr-Ti 及 Co-Ni-Fe-Cr-Ti(Si, B) 两种体系高温合金,合金中元素 Ti, Cr 作为活性组元加入,元素 Cr, Ni, Co 还有利于保证合金具备好的高温性能,加入元素 Fe 则是为了使合金中活性组元保持较高的活性<sup>[10,12]</sup>, Si, B 为降熔元素,本文对这两种体系合金在 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 陶瓷上的润湿行为进行研究,为进一步研制新型高温钎料提供实验基础和理论依据。

## 1 实验方法

采用座滴法在真空状态下测量合金在 1493 K 温度下对 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 陶瓷的润湿角,实验中使用的 Ni-Fe-Cr-Ti 系及 Co-Ni-Fe-Cr-Ti(Si, B) 系合金按下述方法制得:将各种高纯度的元素粉末(200—300 目)按配比称量,并机械混合均匀,混合粉末经精细模具压制直径 4 mm 的圆柱状合金坯体,其质量约为 80—100 mg,使用的各粉末的纯度分别为: Ni 99.6%, Fe 99.0%, Cr 99.5%, Ti 99.2%, Co 99.2%, Si 99.0%, B 99.999%, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 尺寸为 12.7 mm×12.7 mm×4.7 mm,润湿实验过程中炉体在 1493 K 温度下热态真空度保持为 1.1×10<sup>-2</sup>—1.6×10<sup>-2</sup> Pa,实验时采取一定的措施以提高样品周围的局部真空度<sup>[13]</sup>,加热过程中合金坯体现场熔化形成合金液滴,样品冷却至室温后测量其润湿角。

采用差热分析法(DTA)测量各合金(元素混合粉末)的液相线温度,通过扫描电镜-波谱仪(SEM-WDS)观察合金与 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 润湿界面或润湿后断开的合金横断面微观组织形貌,测试了相应的元素面分布,通过能谱仪(EDS)定量分析了界面某些微区的成分。

## 2 实验结果与讨论

首先选用 Ni-Fe-Cr 系合金作为母合金,在此基础上加入不同含量的 Ti,研究合金成分对润湿性的影响,结果见表 1,对于选择的三种不同含 Ti 量的合金(合金 A, B, C),在加热过程中钎料与 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 之间均发生了界面结合,但界面结合的牢固程度与含 Ti 量有关,含 Ti 量较低的样品 A 和 B,高温下虽然实现了界面连接,但在冷却过程中因钎料与 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 陶瓷之间热膨胀系数不匹配产生界面残余热应力,使界面断开,具体表现为内聚型断裂(cohesive fracture),裂纹沿界面在陶瓷内部发生,随 Ni-Fe-Cr-Ti 系合金中含 Ti 量的增加,合金对 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的润湿性逐渐改善,粘附能力也逐渐增强,对于含 Ti 量较高的合金 C,其对 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 陶瓷的润湿角最低(27.3°),合金冷却后较牢固地粘附于 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 上。

表 1 Ni-Fe-Cr-Ti 及 Co-Ni-Fe-Cr-Ti(Si, B) 系高温钎料对 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 陶瓷的润湿性实验结果

Table 1 Experimental results of wettability of Ni-Fe-Cr-Ti and Co-Ni-Fe-Cr-Ti(Si, B) system alloys on Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (heating condition: 1493 K, 10 min)

Alloy code	Composition, mass fraction, %							Liquidus temperature, K	Wetting angle, deg	Interfacial fracture type
	Ni	Fe	Co	Cr	Ti	Si	B			
A	26—34	Balance	—	11—21	14—20	—	—	1411.2	67.4	Cohesive fracture
B	26—34	Balance	—	11—21	20—24	—	—	1429.3	42.5	Cohesive fracture
C	26—34	Balance	—	11—21	24—29	—	—	1476.6	27.3	Good adhesion
Y28	20—26	Balance	6—13	11—21	20—24	0.6—3.6	0.3—2	1454.2	58.2	Adhesive fracture
Y21-44	6—12	Balance	26—34	11—21	14—20	0.6—3.6	0.3—2	1450.4	20.0	Good adhesion

图 1 给出了三种合金的润湿实验样品的宏观照片。图 2 为合金 C(Ni-Fe-Cr-(24—29)Ti) 与 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 润湿界面的微观组织形貌及元素 Ti, Cr, Ni, Fe 的面分布。可见, 钎料中的元素 Cr 向紧靠 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的界面区(宽度约 13.4—21.5 μm) 进行扩散, 并且有一定的富集。元素 Ni, Fe 也表现出相同的扩散倾向。但在此界面区中, Ni 元素扩散距离与元素 Cr 基本相同, 而元素 Fe 则只是扩散到离 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 稍远的较窄区。在离 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 表面更远的界面上, 富 Ti 区与富 Cr, Ni, Fe 区以近似的彼此分离的形式交错分布。进

一步借助能谱仪 (EDS) 对靠近 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 界面的某些微区进行了成分定量分析, 结果如表 2 所示。根据文献 [6] 的分析, 真空度 10<sup>-2</sup>—10<sup>-3</sup> Pa, 温度 1473—1523 K 的加热条件会导致 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 陶瓷的自发分解 (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> → 3Si+1N)。表 2 的结果则表明, 接下来发生的反应是元素 Cr, Ni, Fe 与从 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 中分解出来的 Si 原子化合生成了复杂的 Cr-Ni-Fe-Si 四元化合物 (见表 2 中 a 区及 b 区), 而从 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 分解出来的 N 原子并未立即与 Cr, Ni, Fe 反应 (a 区及 b 区未检测到 N 元素的存在), 而是扩散到离 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

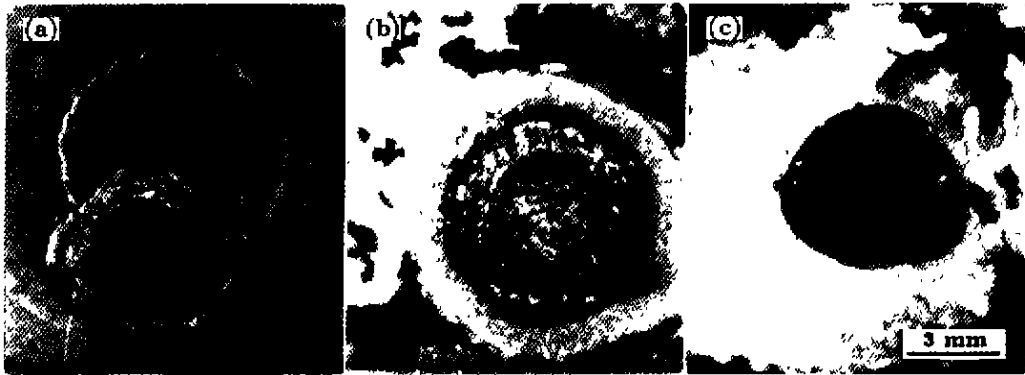


图 1 合金 A, Y28 和 Y21-44 在 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 上润湿性宏观照片  
Fig.1 Photographs showing wettabilities of alloy A (a), alloy Y28 (b) and alloy Y21-44 (c) on Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

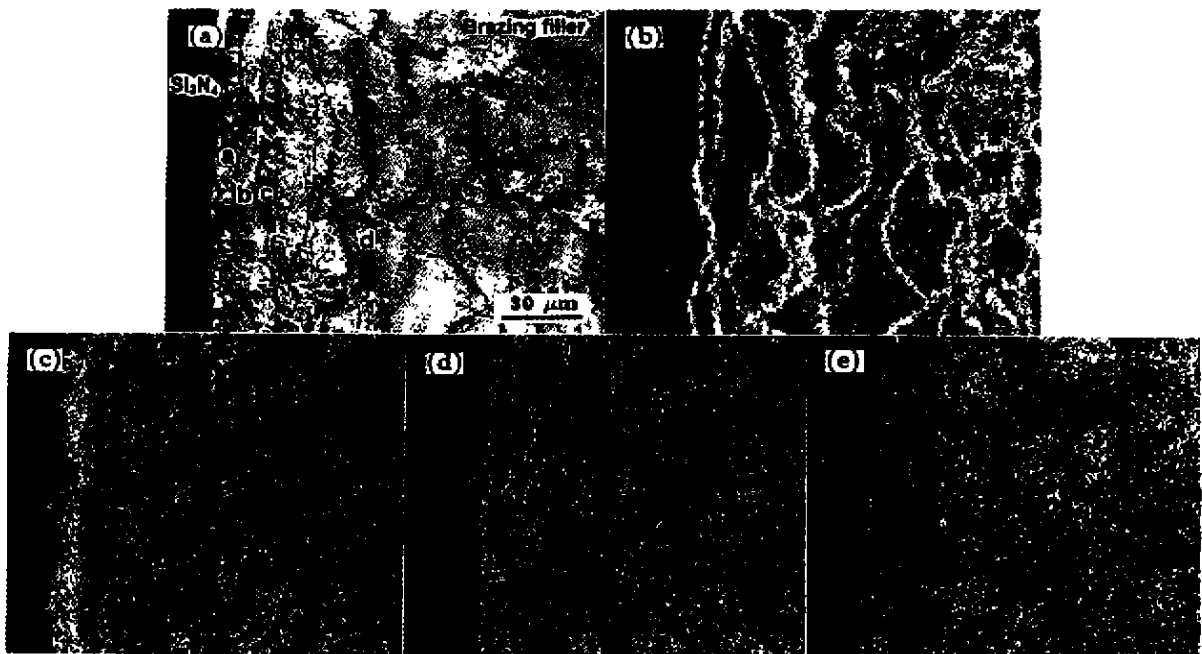


图 2 Ni-Fe-Cr-(24—29)Ti 合金 / Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 界面的微观组织形貌及元素 Ti, Cr, Fe, Ni 的面分布  
Fig.2 Microstructure of the Ni-Fe-Cr-(24—29)Ti alloy / Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> interface (a) and area distribution images of elements Ti (b), Cr (c), Fe (d) and Ni (e)

表面稍远的富 Ti 区并与之发生反应 (在界面 c 和 d 区能同时检测到元素 Ti, N 的存在). 从热力学角度看, TiN 是一种极为稳定的氮化物. 由每摩尔  $N_2$  生成的 Fe-N, Cr-N, Si-N, Ti-N 等化合物中, TiN 的标准自由能  $\Delta G^\circ$  最低<sup>[14]</sup>, 因此在高温 (1493 K) 下, 从  $Si_3N_4$  中分解出的 N 原子优先与 Ti 化合, 形成 TiN. 界面 c 区和 d 区可理解为含有 TiN 的复杂多元混合物. Ti 元素虽然未能像元素 Cr, Ni 那样优先向  $Si_3N_4$  表面富集, 但从表 1 可见, Ti 元素含量的增加对于改善 Ni-Fe-Cr-Ti 系合金的润湿性仍有重要意义. Ti 含量增加保证了  $Ti+N \rightarrow TiN$  反应的顺利进行, 从而推动了  $Si_3N_4$  的分解和界面四元化合物的生成, 从而促进了合金对  $Si_3N_4$  的润湿及界面结合.

表 2 合金 C 与  $Si_3N_4$  界面上某些区域 EDS 成分分析结果

Table 2 Composition of different zones near the interface between alloy C and  $Si_3N_4$  in Fig.2a by EDS

(atomic fraction, %)						
Zone	Si	Ti	Cr	Fe	Ni	N
a	18.06	0.29	48.92	10.14	22.58	-
b	12.10	0.41	22.77	40.42	24.30	-
c	5.33	39.33	17.11	18.71	9.35	10.16
d	2.93	54.59	8.52	9.07	8.30	15.59

对于含有元素 Ti 的活性钎料, 含 Ti 量越高, 合金的脆性越大. 因此新设计了两种钎料合金 Y28 及 Y21-44, 合金中的含 Ti 量控制在较低的水平. 为保持活性元素 Cr 或 Ti 具有较高的活性, 对于新设计的合金 Y28, 相对于合金 B 而言, 用适量的 Co 代替部分 Ni 但 Ni+Co 的总量略有增加; 对于合金 Y21-44, 相对于合金 A 而言, 加入了与原来 Ni 含量相当的 Co, 同时保留了少量 Ni. 表 3 给出了元素 Ti 和 Cr 在几种不同熔液中的溶解焓, 从这些数据可以判断, 元素 Ti 和 Cr 在三种不同熔液中的活性是按  $Ni \rightarrow Co \rightarrow Fe$  的顺序逐渐提高的. 这说明钎料合金中保持一定含量的元素 Fe 对于保证 Cr 或 Ti 在合金中保持较高的活性是必要的. 同时还说明上述合金成分的调整 (特别是合金 Y21-44 的成分设计) 有利于提高 Ti 或 Cr 的活性.

润湿性实验结果表明, 合金 Y28 对  $Si_3N_4$  的润湿角为  $58.2^\circ$  (表 1), 而且合金与  $Si_3N_4$  陶瓷界面发生了粘附型断裂 (adhesive fracture), 裂纹发生在钎料合金与陶瓷之间的界面上. 据此判断 Y28 合金对  $Si_3N_4$  的润湿能力相对于合金 B 减弱了. Co 基钎料合金 Y21-44 对  $Si_3N_4$  的润湿能力相对于合金 A 大大增强, 润湿角由原

来的  $67.4^\circ$  降至  $20.0^\circ$ , 样品冷却后能获得结合牢固的润湿界面. 成分调整后合金润湿性变化的规律可通过下述界面显微分析进行讨论.

表 3 Ti 和 Cr 在几种不同熔液中的溶解焓<sup>[15]</sup>

Table 3 Dissolution enthalpies of Ti and Cr in different melts<sup>[15]</sup>

Melt	(kJ/mol)	
	$\Delta H_{Ti}$	$\Delta H_{Cr}$
Ni	-170	-27
Co	-140	-18
Fe	-82	-6

图 3 为断开后的 Y28 合金样品横截面的微观组织及元素 Ti, Cr, Fe, Co, Ni 的面分布. 可见, 元素 Ti 和 Cr 均从钎料合金中向  $Si_3N_4$  表面扩散和富集, 表现出了明显的界面活性特点. 另外, 在靠近合金基体的界面上形成了一个富 Ti、贫 Cr 的反应带. 根据微区 EDS 分析结果 (见表 4) 判断, 在  $Si_3N_4$  与钎料间的界面过渡区由三个不同成分的区域组成, 分别对应 Fe-Ni-Co-Cr-Ti-Si 复杂多元硅化物区 (图 3a 中 a 区); Fe-Ni-Co-Cr-Ti 多元合金相区 (图 3a 中 b 区) 和 Ti+TiN 区 (图 3a 中 c 区). 显然, 这种过渡形式的界面产物不利于  $Si_3N_4$  与钎料的界面结合. 润湿样品冷却后断裂发生在  $Si_3N_4$  与脆性的复杂多元硅化物的界面上.

图 4 显示合金 Y21-44 与  $Si_3N_4$  的润湿界面微观图. 从元素分布图可知, 元素 Cr 强烈地向  $Si_3N_4$  表面富集, 富集区宽度约为  $11.9 \mu m$ . 表 5 中 EDS 分析结果表明, Cr 的富集区生成物为硅化物 Cr (FeNiCo) Si (图 4a 中 a 区). 由于这种硅化物不含元素 Ti, 因此该化合物的脆性相对于 Y28 合金与  $Si_3N_4$  界面形成的复杂多元化合物有所缓解. 从图 4b 还可看到, 元素 Ti 的界面活性作用因 Ti 含量较低而未能充分表现出来. 根据成分分析结果, 在比较接近  $Si_3N_4$  表面、分布于钎料合金基体上的富 Ti 区 (图 4a 中 b 区), 主要物相应为 Ti+TiN, 所以 Ti 元素仍然起到了如前所述 (C 合金) 的促进界面润湿与界面连接的作用. 这种从  $Si_3N_4$  向不含 Ti 的硅化物、再向 Fe-Co-Ni-Cr(Ti) 基体过渡的结构形式保证了  $Si_3N_4$  与钎料合金之间牢固的界面结合. 合金 Y21-44 对  $Si_3N_4$  的这种润湿能力与合金 C 基本相当, 但合金的含 Ti 量得到很大程度的降低, 这对于研制脆性不太大的高温钎料具有积极意义.

比较 Y28 及 Y21-44 两种合金对  $Si_3N_4$  的润湿性结果表明, 成分的变化会导致不同的界面反应产物过渡结构, 这对合金润湿能力及界面结合力产生了重要影响.

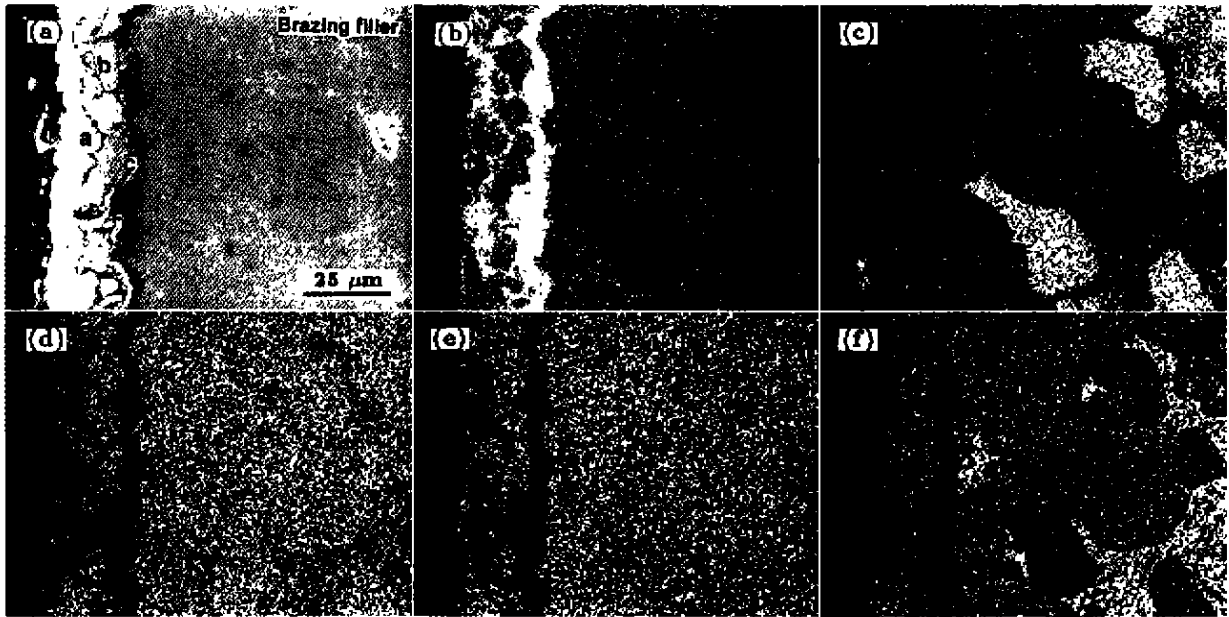


图 3 Y28 合金 (Ni-Co-Fe-Cr-(20—24)Ti)/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 横截面微观组织及元素 Ti, Cr, Fe, Co, Ni 的面分布

Fig.3 Microstructure of the cross-section of alloy Y28/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (a) and area distribution images of elements Ti (b), Cr (c), Fe (d), Co (e) and Ni (f)

表 4 Y28 合金靠近 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 界面某些区域 EDS 成分分析结果

Table 4 Composition of different zones in Fig.3a by EDS

Zone	(atomic fraction, %)						
	Si	Ti	Cr	Fe	Ni	Co	N
a	8.37	26.84	15.19	22.72	17.52	9.36	-
b	2.80	29.47	15.06	23.75	18.91	10.01	-
c	0.12	73.27	0.37	0.41	0.19	0.10	25.53

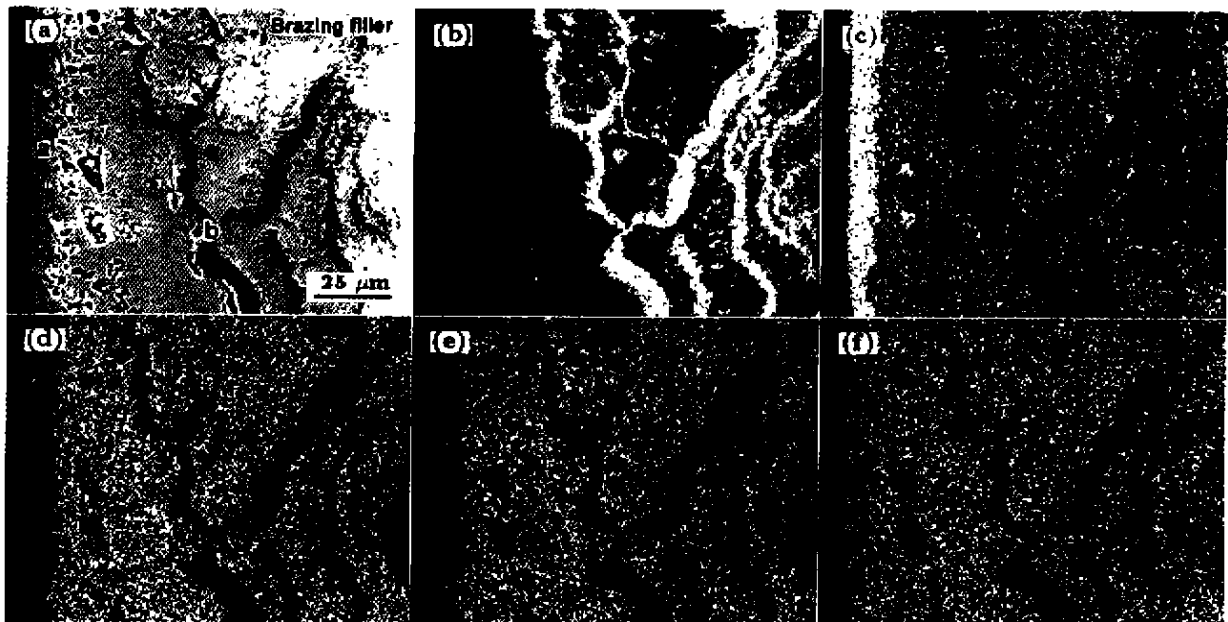


图 4 Y21-44 合金 (Co-Ni-Fe-Cr-(14—20)Ti)/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 界面的微观组织及元素 Ti, Cr, Fe, Co, Ni 的面分布

Fig.4 Microstructure of Co-Ni-Fe-Cr-(14—20)Ti alloy/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> interface (a) and area distribution images of elements Ti (b), Cr (c), Fe (d), Co (e) and Ni (f)

表5 合金 Y21-44/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 界面上某些区域 EDS 成分分析结果  
Table 5 Composition of different zones in Fig.4a by EDS

Zone	(atomic fraction. %)						
	Si	Ti	Cr	Fe	Ni	Co	N
a	20.17	-	56.68	5.82	4.11	13.22	-
b	2.54	66.08	4.44	3.68	1.20	4.21	17.86

### 3 结论

(1) 以 Ni-Fe-Cr 系母合金为基础, 分别加入含量为 14%—20%, 20%—24%, 24%—29% 的元素 Ti, 在 1493 K, 10 min 的真空加热条件下, 合金对 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的润湿性逐渐改善 (润湿角分别为 67.4°, 42.5° 和 27.3°).

(2) 在 Ni-Fe-Cr-(24—29)Ti 合金 / Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 界面上, 在紧靠 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的界面区, 钎料中的元素 Cr 发生了扩散和富集, 生成了复杂的 Cr-Ni-Fe-Si 四元化合物. Ti 元素优先与从 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 中分解出的 N 原子化合形成 TiN, Ti 元素含量的增加可推动 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的分解和界面四元化合物的生成, 从而促进合金对 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的润湿及界面结合.

(3) Ni-Fe-Cr-Ti 系合金成分的改变会导致形成不同的界面反应产物过渡结构, 而这将对合金润湿能力及界面结合能力产生重要影响.

(4) 对于 Ni-Fe-Cr-(20—24)Ti 合金, 保持含 Ti 量不变, 加入适量的 Co 并适当降低 Ni 含量, 则形成 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Fe-Ni-Co-Cr-Ti-Si 复杂多元硅化物 (脆性)/Fe-Ni-Co-Cr-Ti(Si) 多元合金相 /Ti+TiN/ 钎料的结构组态, 该组态不利于 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 与钎料的界面结合.

(5) 对于 Ni-Fe-Cr-(14—20)Ti 合金, 保持含 Ti 量不变, 加入与 Ni 含量相当的 Co 并保留少量 Ni, 则结构组态为: Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/不含 Ti 硅化物 / 钎料. 该界面结构能保证钎料合金对 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 润湿 (20.0°), 并形成牢固的界面结合.

### 参考文献

- [1] Naka M, Kubo M. *J Mater Sci*, 1987; 22: 4417  
[2] Naka M, Kubo M. *Trans JWRI*, 1990; 19(2): 21

- [3] Naka M, Kubo M. *Trans JWRI*, 1987; 16(1): 83  
[4] Okamura H. *Welding Int*, 1993; 7: 236  
[5] Kang S, Kim H J. *Welding J*, 1995; 74: 289s  
[6] Tillmann W, Lugscheider E, Schlimbach K, Manter C, Indacochea J E. *Welding J*, 1998; 77: 103s  
[7] Chen J H, Wang G Z. *J Mater Sci Lett*, 1993; 12: 87  
[8] Lu S P, Guo Y, Chen L S. In: Wang S Y, Wang L S eds., *Proc 8th Annual Symposium on Welding of China*. Vol. I, Beijing: Machinery Industry Press, 1997; 274  
(陆善平, 郭义, 陈亮山. 见: 王守业, 王麟书主编, 第八次全国焊接会议论文集, 第 1 卷, 北京: 机械工业出版社, 1997: 274)  
[9] Lu S P, Dong X Z, Wu Q, Guo Y. *Chin J Mater Res*, 1998; 12: 295  
(陆善平, 董秀中, 吴庆, 郭义. 材料研究学报, 1998; 12: 295)  
[10] Wan C G, Kritsalis P. *J Mater Sci Technol*, 1994; 10: 466  
[11] Feng J C, Qian Y Y. In: Wang S Y, Wang L S eds., *Proc 8th Annual Symposium on Welding of China*, Vol. I, Beijing: Machinery Industry Press, 1997; 321  
(冯吉才, 钱乙余. 见: 王守业, 王麟书主编, 第八次全国焊接会议论文集, 第 1 卷, 北京: 机械工业出版社, 1997: 321)  
[12] Xiong H P, Wan C G, Zhou Z F. *Metall Mater Trans*, 1998; 29A: 2591  
[13] Liu C X. In: *New Advances in Welding and Allied Processes—Proc Int Conf*, 8–10 May 1991, Beijing, Sponsored by the Welding Institution of the Chinese Mechanical Engineering Society (WI CMES), and Deutscher Verband für Schweisstechnik EV (DVS), International Academic Publishers, 1991: 345  
[14] Klomp J T, Nicholas M G. *Joining Ceramics*. London: Chapman & Hall, 1990: 113  
[15] Miedema A R, Boer F R, Boom R, Dorleij J W F. *CAL-PHAD*, 1977; 1: 353