

## NiPdCrBSi 合金的钎焊组织与性能研究

杜静<sup>1</sup>, 柳青<sup>2</sup>, 高勤琴<sup>2</sup>, 魏明霞<sup>1</sup>, 谢明<sup>2\*</sup>, 陈永泰<sup>2</sup>, 杨有才<sup>2</sup>

(1. 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司, 沈阳 110043;

2. 昆明贵金属研究所 稀贵金属综合利用新技术国家重点实验室, 昆明 650106)

**摘要:** 以真空雾化制粉技术制备了 NiPdCrBSi 合金粉末, 采用差热分析(DTA)、扫描电镜(SEM)、金相显微镜(OM)和真空钎焊等技术, 对所得合金粉末的形貌、熔化特性, 以及在不锈钢上的焊接铺展组织进行研究, 并对钎焊界面组织进行分析表征。结果表明, NiPdCrBSi 合金钎料在不锈钢上的润湿铺展性良好, 所形成的焊接界面层的润湿机理, 主要以扩散机制为主导, 增强了合金的焊接性能和可靠性。

**关键词:** 金属材料; NiPdCrBSi 合金; 形貌组织; 铺展性; 润湿性; 钎焊界面

**中图分类号:** TG146.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2019)S1-0020-04

### Study on Brazing Microstructure and Properties of NiPdCrBSi Alloy

DU Jing<sup>1</sup>, LIU Qing<sup>2</sup>, GAO Qinqin<sup>2</sup>, WEI Mingxia<sup>1</sup>, XIE Ming<sup>2\*</sup>, CHEN Yongtai<sup>2</sup>, YANG Youcai<sup>2</sup>

(1. AECC Shenyang Liming AERO-engine Co. Ltd., Shenyang 110043, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Technologies for Comprehensive Utilization of Platinum Metal, Kunming Institute of Precious Metals, Kunming 650106, China)

**Abstract:** The NiPdCrBSi alloy powders were prepared by vacuum atomization technology. The morphology, melting characteristics and welding spreading structure of NiPdCrBSi alloy powder were studied by means of differential thermal analysis (DTA), scanning electron microscopy (SEM), metallographic microscopy (OM) and vacuum brazing, and the brazing interface was also studied. The results showed that the wettability and spreading of NiPdCrBSi alloy brazing filler metal on stainless steel was good, and the wettability mechanism of the welded interface layer formed was mainly dominated by diffusion mechanism, which enhanced the weldability and reliability of the alloy.

**Key words:** metal materials; NiPdCrBSi alloy; microstructures; spread ability; wettability; brazing interface

NiPdCrBSi 合金钎料具有适宜的固/液相线温度、低的蒸气压、优良的润湿性、较高的钎焊接头强度和稳定性等, 适合于高温钎焊。在航空航天发动机、燃气轮机、大功率电子器件、电动汽车、高铁电机等领域得到重要应用<sup>[1-2]</sup>, 可用于形状复杂的结构部件之间的连接, 如不锈钢、耐热合金、难熔金属、陶瓷与金属、钛合金、电子封装器件等的钎焊连接<sup>[3-4]</sup>。

随着上述有关高温合金结构材料领域的发展和广泛应用, 对焊接材料的组织、性能、气密性、结构复杂性、焊接可靠性等提出了更高的要求。因此, 本文从 NiPdCrBSi 合金钎料与不锈钢钎焊的实际需要出发, 采用真空雾化制粉技术, 制备了 NiPdCrBSi 合金粉末, 对其粉末形貌、熔化特性、在不锈钢(1Cr18Ni9Ti)上的铺展性能, 以及钎焊界面的组织结构进行分析研究, 为该合金材料的进一步应用提

收稿日期: 2019-10-11

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0305700)、国家自然科学基金(U1602275, U1602271); 云南省重大科技专项(2018ZE011, 2018ZE012, 2018ZE022, 2018ZE026)

第一作者: 杜静, 女, 高级工程师, 研究方向: 金属钎焊材料。E-mail: dujing1232@163.com

\*通讯作者: 谢明, 男, 博士, 研究员, 研究方向: 粉末冶金新材料与新技术。E-mail: powder@ipm.com.cn

供参考。

## 1 实验

### 1.1 材料制备

本文采用纯度(质量分数)为 99.99% 的原材料, 在 KMGA-5 型真空雾化设备中, 制备 NiPdCrBSi 合金粉末, 实验合金成分如表 1 所示。

表 1 NiPdCrBSi 合金成分(质量分数)

Tab.1 Composition (mass fraction) of NiPdCrBSi alloys /%				
Ni	Pd	Cr	B	Si
余量	37	15	1.8	3.2

### 1.2 实验条件

真空制粉粉末粉末形状为球形和类球形, 粒径  $<75 \mu\text{m}$  (-200 目)。

表面润湿实验基材为 304 不锈钢, 除油、清洗干净。

真空钎焊温度  $1050^\circ\text{C}$ 、真空度  $<1 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ 、升温速度  $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 。

### 1.3 组织性能分析表征

用 S-3400N 型扫描电子显微镜(日本日立公司)对合金粉末形貌、材料表面的组织形貌情况进行观察和分析; 用 DMI8 型金相显微镜(德国徕卡公司)进行合金的横向组织分析和研究; 用 STA409 PG/PC 型差示量热扫描仪(德国耐驰公司)进行合金的固相点温度和液相点温度测量; 用 SCI-1700 型高温真空接触角测量仪(北京中仪科信科技有限公司)观察和测量合金材料的润湿情况。

## 2 结果与讨论

### 2.1 合金粉末的形貌分析

采用扫描电子显微镜观察真空雾化 NiPdCrBSi 合金粉末的外观形貌, 如图 1 所示。从图 1 可以看出, 真空雾化制备的 NiPdCrBSi 合金粉末外观形貌为球形和类球形, 粉末粒径范围  $<75 \mu\text{m}$ 。粉末表面干净、无异物, 粉末表面有雾化时相互碰撞留下的凹坑, 以及冷却凝固时留下的冷隔。

### 2.2 合金的熔化特性

采用差热分析仪(DTA)进行 NiPdCrBSi 合金的固相点温度、液相点温度, 以及固液相线温度间隔进行测量, 结果列于表 2。

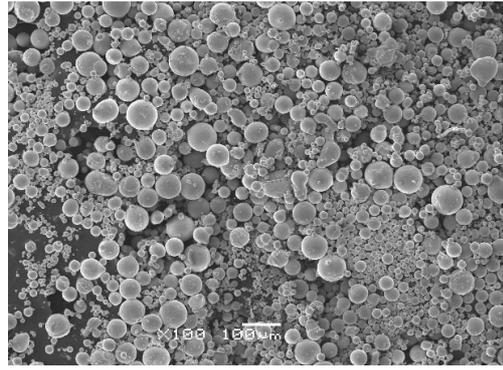


图 1 NiPdCrBSi 合金粉末形貌

Fig.1 Morphology of NiPdCrBSi alloy powder

表 2 实验合金的熔化特性

Tab.2 Metal characteristic of experiment alloys			
合金名称	固相点/ $^\circ\text{C}$	液相点/ $^\circ\text{C}$	固液相线温度间隔/ $^\circ\text{C}$
NiPdCrBSi	818	992	174

### 2.3 合金的铺展性研究

NiPdCrBSi 合金的铺展性试验采用的母材为不锈钢(1Cr18Ni9Ti), 不同的试验温度下的保温时间均为 15 min, 真空度为  $5 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ , 结果如图 2 所示。由图 2 可以看出, NiPdCrBSi 合金在不锈钢母材上的润湿铺展性较好。随着钎焊温度升高, 合金材料的润湿角逐渐减小, 铺展性逐渐增加。说明提高合金的熔化温度, 有利于降低了液态金属与不锈钢基体金属的固/液界面张力, 从而提高钎焊合金材料对母材的润湿能力。

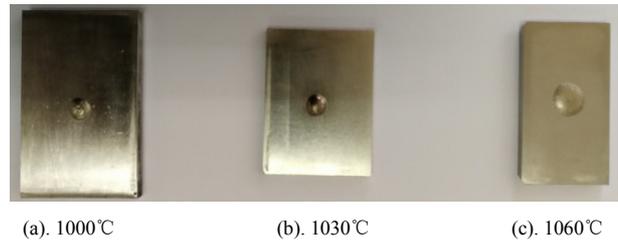


图 2 NiPdCrBSi 合金不同温度下在不锈钢上的铺展

Fig.2 NiPdCrBSi alloy spreaded on stainless steel at different temperatures

### 2.4 焊接界面的组织分析

钯具有良好的塑性和抗氧化性, 但钯的熔点很高( $1552^\circ\text{C}$ ), 为降低其熔点, 加入镍元素<sup>[5]</sup>。镍含量为 40% 的 Pd-Ni 合金, 固相线与液相线重叠, 形成低熔点固溶体, 其熔化温度为  $1237^\circ\text{C}$ , 具有良好的

加工性能。但是该钎料的熔化温度间隔较小、熔点太高，高于很多合金的晶粒长大和热处理温度，有必要再降低其熔点。

为了降低 Pd-Ni 合金的熔点、改善其耐高温性能，可加入 Cr、B、Si 等元素<sup>[6]</sup>。添加 Cr 可提高钎料的抗高温蠕变性，其最高液相点温度高达 1250℃；添加 B 可增强钎料母材的晶界渗透性，提高钎焊强度；加入 Si 可降低液相线温度，其效果比添加 B 好。

添加的上述合金元素将使 Pd-Ni 合金中形成较多的脆性中间化合物相，恶化材料的加工性能；在钎焊时还会在钎缝中形成其它脆性中间化合物，导致钎焊接头的力学性能降低。因此，为了获得较高的钎焊接头的强度，设计时应严格控制镍基钎料中 Cr、Si、B 的元素含量：Cr 含量小于 16%、Si 含量小于 4%、B 含量小于 2%，以降低其钎焊时钎缝中形成脆性化合物的数量，提高钎料对母材的润湿性。本文制备的 NiPdCrBSi 合金与不锈钢的焊接状态的金相显微组织如图 3 所示。

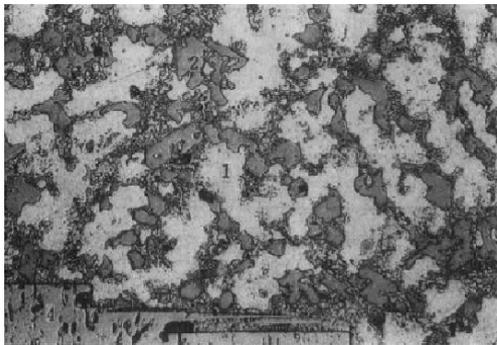


图 3 NiPdCrBSi 合金/不锈钢的钎料组织

Fig.3 Microstructure of NiPdCrBSi alloy/stainless steel solder

由图 3 可知，NiPdCrBSi 合金组织由白色的镍固溶体( $\alpha$  相)，灰色的硼化镍( $\beta$  相)、硅化镍( $\gamma$  相)，以及黑色的硼化铬( $\delta$  相)组成。由于在 Ni-Pd 合金中加入了 Cr、B、Si 组元，这些组元在钎料组织中易形成脆性中间化合物相，恶化了加工性能，难于采用轧制、冷拉拔等传统压力加工的方法制备出丝材或片材。因此，只能采用真空雾化制粉技术制备 NiPdCrBSi 合金钎焊粉末，解决了脆性钎料加工性能差、常规方法无法加工成型的技术问题。

图 4 为用扫描电子显微镜得到的 NiPdCrBSi 合金/不锈钢的结合界面线扫描图像。

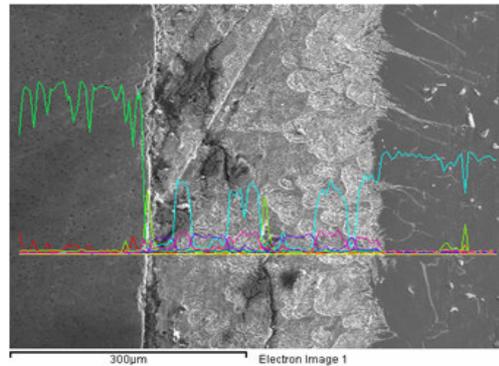


图 4 NiPdCrBSi 合金/不锈钢的界面线扫描

Fig.4 Interface line scanning of NiPdCrBSi alloy/stainless steel

由图 4 可以看出，NiPdCrBSi 合金中的 Ni 元素和 Pd 元素在不锈钢中有明显的扩散。这是由于界面层的 Ni、Pd 含量较高，在钎料升温至液相线时，Ni、Pd 元素向不锈钢过渡层界面发生选择性原子扩散，形成一条连续的白色扩散层，达到冶金结合。说明焊接过程的界面润湿机理主要以界面扩散机制为主导，有利于提高钎料对母材的润湿性，增强焊接接头的强度和可靠性。预计 NiPdCrBSi 合金钎料可应用于相关领域。

### 3 结论

1) 采用真空雾化制粉技术，制备了 Ni-37Pd-15Cr-1.8B-3.2Si 合金粉体材料，所得粉末为球形和类球形，粒径 $<75 \mu\text{m}$ ，其成分均匀，表面干净、无异物。

2) 随着钎焊温度的提高，NiPdCrBSi 合金的润湿角逐渐减小，铺展性逐渐增加，降低了液态金属与不锈钢基体金属的固/液界面张力，从而提高了合金材料对母材的润湿能力。

3) NiPdCrBSi 合金中的 Ni 元素和 Pd 元素向不锈钢过渡层界面发生选择性原子扩散，焊接过程的界面润湿机理主要以界面扩散机制为主导，达到冶金结合，有利于提高钎料对母材的润湿性，增强焊接接头的性能。

**参考文献:**

- [1] 贾志华, 王轶, 李银娥, 等. 钼合金钎料的研究进展[J]. 贵金属, 2018, 39(S1): 58-65.
- [2] 胡昌义, 刘时杰. 贵金属新材料[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2015: 350-352.
- [3] 贺军四, 蔡志红, 刘福平. 新型含钼镍基钎料钎焊不锈钢接头的性能分析[J]. 贵金属, 2017, 38(S1): 77-79.
- [4] 谢元锋, 吕宏, 康志君, 等. Pd 基活性钎料对 SiC 陶瓷的润湿研究[J]. 稀有金属, 2007, 31(4): 507-509.
- [5] 王义峰, 曹健, 冯吉才. 陶瓷与金属的连接方法与研究进展[J]. 航空制造技术, 2012(21): 54-57.
- [6] 陈登权. 陶瓷/金属钎焊用钎料及其钎焊工艺进展[J]. 贵金属, 2001, 22(1): 53-55.
- [7] 陈靖, 毛忠汉, 祖国兴, 等. 气雾化制备 NiPdCrBSi 钎料粉末的工艺[J]. 中国有色金属学报, 1998, 8(S2): 230-233.
- [8] 何纯孝, 李光芳. 贵金属合金相图及化合物结构参数[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007: 273-274.
- [9] 郭菲菲, 陈晓宇, 史秀梅, 等. 钼含量对 Ag-Cu-Pd 钎料合金组织和性能的影响[J]. 有色金属科学与工程, 2017, 8(3): 64-68.