

文章编号: 1006-4710(2011)03-0359-04

# CuNiMnFe/30CrMnSi 双金属复合材料断裂行为研究

邹军涛, 王献辉, 肖鹏, 梁淑华

(西安理工大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 对由熔铸法制备的 CuNiMnFe/30CrMnSi 双金属复合材料标准试棒与界面处具有阶梯状的变径试棒进行拉伸试验。测试了 CuNiMnFe/30CrMnSi 复合材料整体及界面的抗拉强度, 表征了断口形貌和界面结合过渡区显微组织。研究结果表明, CuNiMnFe/30CrMnSi 双金属复合材料拉伸断裂优先发生在 CuNiMnFe 合金区域, 说明该复合材料中界面结合强度明显高于 CuNiMnFe 合金强度。CuNiMnFe/30CrMnSi 复合材料界面结合强度较高主要是由于在 CuNiMnFe 合金和 30CrMnSi 合金熔铸时于界面结合处形成了一种结合过渡层, 从而促进了 CuNiMnFe 合金和 30CrMnSi 合金的冶金结合。

**关键词:** 熔铸法; 复合材料; 界面; 抗拉强度; 断口

**中图分类号:** TG146; TB331 **文献标志码:** A

## Investigation into Fracture Behaviors of CuNiMnFe/30CrMnSi Bi-Metal Composite Materials

ZOU Juntao, WANG Xianhui, XIAO Peng, LIANG Shuhua

(Faculty of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** CuNiMnFe/30CrMnSi bi-metal composite material were prepared by casting and infiltration method, followed by quenching and tempering treatment. The composite materials were machined into a standard bar and a step-like bar. The tensile strengths of CuNiMnFe/30CrMnSi composite material were determined by tensile test, and the fracture morphologies of two samples and the interface bonding transition zone of CuNiMnFe/30CrMnSi composite materials were analyzed by a scanning electron microscope. The results show that the tensile fracture prefers to occur inside the CuNiMnFe alloy, suggesting that the interface bonding strength between CuNiMnFe and 30CrMnSi alloy is larger than the tensile strength of CuNiMnFe alloy. This is due to the formation of a bonding transition layer, which can promote the metallurgical bond of CuNiMnFe and 30CrMnSi during the preparing process of the CuNiMnFe/30CrMnSi composite material.

**Key words:** casting and infiltration; composite material; interface; tensile strength; fracture

双金属复合材料由于兼有两种金属优异的性能而在机械工程领域得到了广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。新型研制的 CuNiMnFe/30CrMnSi 复合材料主要用作发动机转子衬套材料<sup>[3-4]</sup>。为了消除发动机转子高速运转(50 000 r/min)时离心剪切力冲击造成的破坏, 要求 CuNiMnFe 合金与 30CrMnSi 合金界面必须具有足够高的结合强度。

大量的研究表明界面组织对增强双金属复合材料的结合强度有着至关重要的作用<sup>[5-9]</sup>, 因而研究界面的形成过程和断裂方式有助于提高复合材料两相结合性能。

然而, 迄今为止, 对 CuNiMnFe/30CrMnSi 复合材料界面的研究国内外鲜有报道, 因此研究该复合材料结合界面组织的形成机理及其断裂方式, 对改

收稿日期: 2011-05-15

基金项目: 陕西省教育厅科学技术研究计划基金资助项目(09JK685)。

作者简介: 邹军涛(1979-), 男, 陕西乾县人, 博士生, 讲师, 研究方向为熔渗技术与复合材料。E-mail: zouji077@163.com。梁淑华(1968-), 女, 辽宁凌源人, 博士, 教授, 博导, 研究方向为电工材料与熔渗技术。E-mail: liangsh@xaut.edu.cn。

善 CuNiMnFe/30CrMnSi 复合材料的结合强度具有非常重要的科学意义和工程价值。

## 1 实验方法

采用真空感应炉熔炼制备 CuNiMnFe 合金,在真空条件下将 CuNiMnFe 合金置于 30CrMnSi 上进行高温烧结,当熔铸温度高于 CuNiMnFe 合金的熔点而低于 30CrMnSi 的熔点时,CuNiMnFe 熔融液体与 30CrMnSi 的表层发生熔铸扩散形成复合材料结合面,将 CuNiMnFe 与 30CrMnSi 连接起来形成双金属复合材料,将 CuNiMnFe/30CrMnSi 复合材料置于 SX-12-10 型箱式电阻炉内进行淬火及回火处理。

将熔铸的 CuNiMnFe/30CrMnSi 复合材料制备成两种抗拉试棒,其中一种是标准试棒,另一种是经过变径处理的阶梯试棒(如图 1 所示),在 HT-10 型万能试验机上进行拉伸试验。两种试棒分别采用 JSM-6 700 型扫描电子显微镜观察拉伸断口形貌和界面组织(腐蚀剂为 25% 稀硝酸溶液和浓硝酸)。



图 1 CuNiMnFe/30CrMnSi 复合材料的抗拉试棒照片

Fig. 1 The tensile test samples for CuNiMnFe/30CrMnSi composite

## 2 实验结果与分析

### 2.1 材料整体及界面的抗拉强度

图 2 是 CuNiMnFe/30CrMnSi 复合材料阶梯试

棒和标准试样拉伸试验后的照片。从图 2 可以明显看出,CuNiMnFe/30CrMnSi 双金属复合材料阶梯试棒拉伸断裂发生在界面结合处,而 CuNiMnFe/30CrMnSi 复合材料标准试样拉伸断裂发生在 CuNiMnFe 合金区域。

变径处理的阶梯试棒发生断裂时的拉应力为  $F = 2\ 430\ \text{kg}/\text{N}$ , 未经过变径的标准试棒的拉应力为  $F = 2\ 230\ \text{kg}/\text{N}$ , CuNiMnFe/30CrMnSi 双金属复合材料抗拉强度可根据公式  $\sigma_b = F/S$  计算获得,变径处理后的阶梯试棒抗拉强度  $\sigma_b = 877\ \text{MPa}$  (从界面结合处断裂),标准试棒抗拉强度  $\sigma_b = 805\ \text{MPa}$  (从 CuNiMnFe 合金部分断裂)。



图 2 CuNiMnFe/30CrMnSi 复合材料的抗拉试棒断裂后的宏观照片

Fig. 2 The fracture pictures of CuNiMnFe/30CrMnSi composite after tensile test

### 2.2 材料的断口组织与分析

#### 2.2.1 CuNiMnFe/30CrMnSi 复合材料整体断裂及断口分析

图 3 是未经变径处理的 CuNiMnFe/30CrMnSi 复合材料标准抗拉试棒的断口形貌。图 3(a)为 CuNiMnFe/30CrMnSi 复合材料抗拉试棒从 CuNiMnFe 合金上断裂的断口全貌。图 3(b)为从 CuNiMnFe 合金上断裂的断面形貌。图 3(c)是合金发生断裂后组织中的晶界部位。

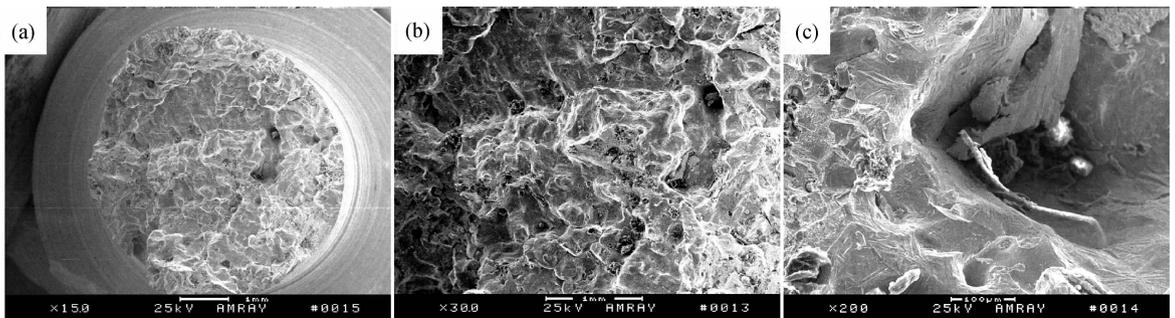


图 3 CuNiMnFe/30CrMnSi 复合材料标准试棒断口形貌

Fig. 3 The fracture morphology of standard test bar for CuNiMnFe/30CrMnSi composite

由图 3(b) 可见 CuNiMnFe 合金断裂形貌中凸显出的晶粒比较粗大, 晶粒直径达到约 0.5 mm。

由图 3(c) 可见断口局部出现较大的韧窝, 晶界处有较多的杂质颗粒, 且杂质颗粒与晶粒不连续呈孤岛状分离。

另外, 根据细晶强化理论可知, CuNiMnFe 合金中由于晶粒比较粗大, 而大大降低了合金的性能, 另一方面由于晶粒间的夹杂物在常温剧烈变形的情况下, 不能随基体做连续变形产生应力集中, 应力的不

断增大促使了裂缝的产生。因此当复合材料承受均匀拉力的时候, 会先从这种大晶粒的晶界处产生裂纹, 裂纹扩展后产生断裂。

### 2.2.2 CuNiMnFe/30CrMnSi 复合材料界面断裂及断口分析

对于进行变径处理的 CuNiMnFe/30CrMnSi 复合材料抗拉试棒, 在抗拉试验过程中断裂会发生在界面处, 断裂状态如图 2 中阶梯试棒所示, 结合界面断口形貌如图 4 所示。

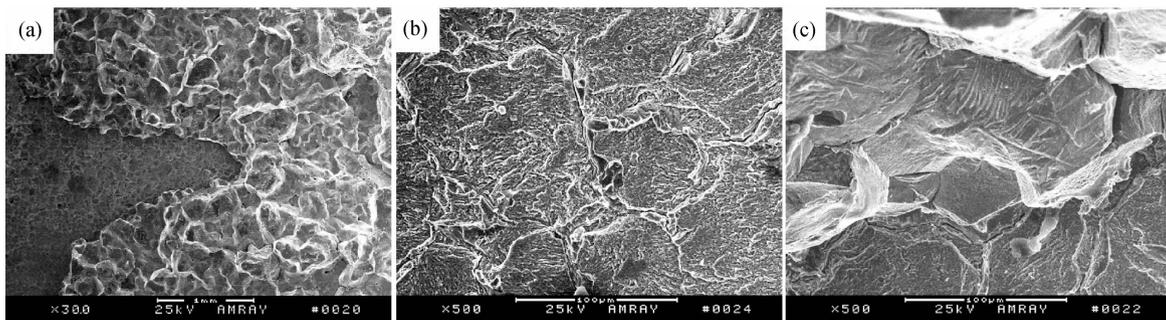


图 4 CuNiMnFe/30CrMnSi 复合材料界面断口组织

Fig. 4 The fracture morphology of CuNiMnFe/30CrMnSi composite interface

从图 4(a) 可以清楚地看到断口中黑色组织较为平滑为 30CrMnSi, 而另一部分灰色凹凸不平组织为 CuNiMnFe 合金, 而且界面断口上 30CrMnSi 细晶粒组织呈现楔形。从力学断裂的角度分析, 在抗拉试棒被拉伸的过程中, 裂纹从图 4(a) 黑色 30CrMnSi 组织“楔形”的左侧产生, 随着裂纹的扩展, 结合面上产生应力集中, 从楔形的顶端处开始发生撕裂, 造成图 4(a) 中较大的 CuNiMnFe 晶粒发生沿晶断裂。

对图 4(a) 中 30CrMnSi 和 CuNiMnFe 两种组织进行 SEM 观察, 其高倍组织如图 4(b) 和图 4(c) 所示。对比图 4(b) 和图 4(c) 中组织形貌, 可以看出 30CrMnSi 晶粒较小, 直径约 100 μm; 而 CuNiMnFe 合金的晶粒直径较大, 约达到 200 ~ 300 μm, 晶界较明显。图 4(b) 中 30CrMnSi 晶粒呈现穿晶平切状态, 这主要因为 30CrMnSi 在熔铸前经过机加工和研磨, 发生界面断裂后, 显现出了 30CrMnSi 晶粒的

原始状态。

由图 4(c) 可见, CuNiMnFe 合金晶界处存在许多细小的析出相, 表现出沿晶断裂的特征, 在较大的晶粒上可以看到断裂面的另一部分表现为解理花样。由此判断界面断裂的原因是, 双金属复合材料界面上 30CrMnSi 晶粒和 CuNiMnFe 合金晶粒大小不均匀, 导致界面起伏不平, 界面中凸出的晶粒由于受力不均匀而产生应力集中, 因此对于 CuNiMnFe/30CrMnSi 复合材料界面进行变径处理的抗拉试棒, 当拉应力较大时就会从界面处发生断裂。

### 2.3 CuNiMnFe/30CrMnSi 复合材料界面组织分析

为了进一步阐明 CuNiMnFe/30CrMnSi 复合材料较高的界面结合强度, 分别对复合材料界面结合过渡区进行 25% 稀硝酸溶液的轻度腐蚀和浓硝酸的深度腐蚀, 腐蚀后界面结合过渡层的组织形貌如图 5(a) 和图 5(b) 所示。

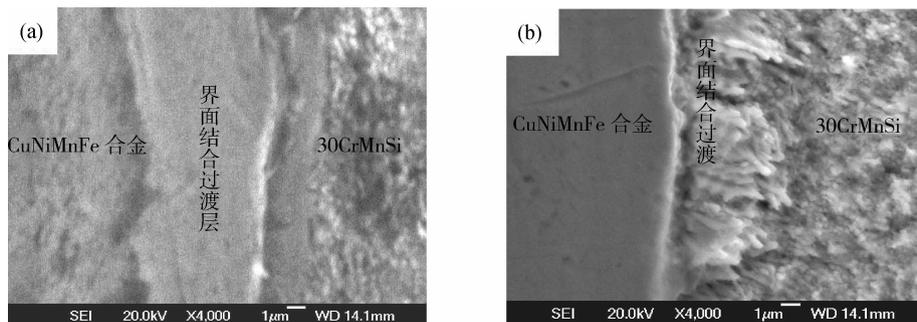


图 5 CuNiMnFe/30CrMnSi 复合材料结合过渡区组织形貌

Fig. 5 The morphology of bonding transition zone for CuNiMnFe/30CrMnSi composites

由图5可见,CuNiMnFe合金与30CrMnSi经过熔铸后界面处存在结合过渡层。图5(a)中CuNiMnFe合金和30CrMnSi的过渡区中形成了灰白色的新的组织。过渡区中新组织的形成是由于高温熔铸过程中CuNiMnFe合金和30CrMnSi合金中原子的相互扩散,以及较长的保温时间使得结合面附近的原子得到了均匀而充分的相互扩散,当界面上达到一定浓度的浓度时发生反应,形成致密的中间过渡层。由图5(a)还可见,在CuNiMnFe合金与扩散层之间存在着明显的界限,而在扩散层与30CrMnSi侧虽然也存在界限,但是与CuNiMnFe合金/扩散层相比较界限不是很明显,这是由于在高温下CuNiMnFe合金中的原子向30CrMnSi中扩散,在靠近30CrMnSi一侧形成了致密的新的合金层。实验结果表明CuNiMnFe/30CrMnSi复合材料的界面所在的过渡区由CuNiMnFe合金侧过渡层,中间扩散过渡层,30CrMnSi合金侧过渡层组成。

由图5(b)可以清楚的看到结合过渡层的组织形貌,在靠近30CrMnSi合金附近的过渡层有明显的棒状晶向CuNiMnFe合金中生长,由于棒状晶的作用相当于纤维紧紧的将30CrMnSi合金和CuNiMnFe合金连接在一起,所以该处的强度较大,一般不容易发生断裂。在棒状晶附近的组织颗粒相对较小,组织相对严密,强度较高,所以一般不会从该处断裂。而在靠近CuNiMnFe合金附近的组织,其颗粒就比较大,组织分布也不均匀,所以在受到均匀拉应力时,裂纹容易扩展,断裂会发生在该处。

### 3 结 论

1) CuNiMnFe/30CrMnSi复合材料断裂首先发生在CuNiMnFe合金部分,表明熔铸法制备的CuNiMnFe/30CrMnSi复合材料中CuNiMnFe合金与30CrMnSi界面结合强度高于CuNiMnFe合金的强度。

2) 在CuNiMnFe/30CrMnSi双金属复合材料界面结合过渡区内形成了一种过渡层,该过渡层的形成有效地促进了CuNiMnFe合金和30CrMnSi的冶金结合,从而CuNiMnFe/30CrMnSi双金属复合材料具有较高的界面结合强度,其强度可达到877 MPa。

#### 参考文献:

[1] Bulent K, Mustafa U. Interfacial microstructure of diffusion bonded inconel 738 and ferritic stainless steel couple[J]. Journal of Material Science & Technology, 2009, 25(4): 527-530.

- [2] 孙显俊,陶杰,郭训忠,等. 爆炸法制备铁/铝双金属复合管的界面组织与结合强度[J]. 机械工程材料, 2011, 35(2): 35-42.  
Sun Xianjun, Tao Jie, Guo Xunzhong, et al. Interface microstructure and bonding strength of Fe/Al double metal composite pipe by explosive method [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2011, 35(2): 35-42.
- [3] 邹军涛,肖鹏,金静静,等. CuNiMn/30CrMnSi整体材料界面过渡层的研究[J]. 铸造技术, 2010, 28(10): 1379-1382.  
Zou Juntao, Xiao Peng, Jin Jingjing, et al. Investigation on the interface transition layer of CuNiMn/30CrMnSi integral material [J]. Foundry Technology, 2010, 28(10): 1379-1382.
- [4] Zou Juntao, Liu Yanfeng, Wang Xianhui, et al. Effect of melt-casting temperature on bonding zone of CuNiMnFe/30CrMnSi integral material [J]. Advanced Materials Research, 2011, (148-149): 664-667.
- [5] 许春伟,李炎,魏世忠,等. 高钒高速钢35CrMo复合轧辊界面组织和性能研究[J]. 铸造技术, 2007, 28(3): 319-322.  
Xu Chunwei, Li Yan, Wei Shizhong, et al. Study on the microstructure and property of roller interface of high vanadium high speed steel 35CrMo [J]. Foundry Technology, 2007, 28(3): 319-322.
- [6] 成小乐,高义民,邢建东,等. 扩散连接Al/Ni/0Cr18Ni9Ti复合材料的界面组织[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(7): 867-869.  
Cheng Xiaole, Gao Yimin, Xing Jiandong, et al. Investigation into intermetallic compounds in Al/Ni/0Cr18Ni9Ti diffusion bonded joint [J]. Journal of Xi'an Jiao Tong University, 2007, 41(7): 867-869.
- [7] 刘磊,赵海军,胡文彬,等. 电铸Ni-SiC金属基复合材料的抗拉强度与微观结构分析[J]. 上海交通大学学报, 2006, 20(1): 120-123.  
Liu Lei, Zhao Haijun, Hu Wenbin, et al. The analysis of tensile strength and microstructure of Ni-SiC composites prepared by electroforming [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2006, 20(1): 120-123.
- [8] 王莺,周元鑫,夏渊明. SiC颗粒增强铝基复合材料冲击拉伸力学性能的试验研究[J]. 材料科学与工艺, 1998, 6(3): 1-6.  
Wang Ying, Zhou Yuanxin, Xia Yuanming. Experimental study of SiC/Al under tensile impact [J]. Material Science & Technology, 1998, 6(3): 1-6.
- [9] 朱达炎,朱教群,梅炳初,等. Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>/TiB<sub>2</sub>复合材料的制备及其组织和力学性能[J]. 武汉理工大学学报, 2005, 27(12): 1-4.  
Zhu Dayan, Zhu Jiaoqun, Mei Binchu, et al. Fabrication microstructure and mechanical properties of Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>/TiB<sub>2</sub> composites [J]. Journal of Wu Han University of Technology, 2005, 27(12): 1-4.