

# 一种新型 Ni<sub>3</sub>Al 基高温耐磨合金的显微组织和性能研究

侯杰, 李尚平, 骆合力

(北京钢研高纳科技股份有限公司, 北京 100081)

**摘要:** 针对我国新一代航空发动机叶冠表面强化用高温耐磨材料的迫切需求, 采用熔炼铸造法制备出一种以碳化铬和NiAl相作为耐磨硬质相的新型Ni<sub>3</sub>Al基高温耐磨合金。显微组织分析、室温硬度测试、高温抗氧化性测试结果显示, 两种耐磨硬质相大量析出并且均匀分布于合金中。与现役的高温耐磨材料相比, 该合金同时具备高的室温硬度和1 050 °C时优异的抗氧化性, 有望成为新一代高温耐磨材料。

**关键词:** Ni<sub>3</sub>Al; 高温耐磨合金; 显微组织; 硬度; 抗氧化

在航空发动机涡轮工作叶片的服役过程中, 为防止由于叶冠接触面在强烈的微动磨损作用下导致失效, 通常采取的有效措施之一是在接触面焊接高温耐磨材料<sup>[1]</sup>。现役的高温耐磨材料有Stellite6、T800、K4208等, 但服役温度低于800 °C。随着新一代航空发动机的研制, 上述材料已不能满足使用要求, 迫切需要开发1 000 °C以上服役的新型高温耐磨材料。

传统高温耐磨材料是在高强韧的金属基体中加入弥散分布的硬质相颗粒, 硬质相主要承受磨损应力, 基体主要起联结支撑硬质相、协调变形和承受冲击应力的作用。Ni<sub>3</sub>Al具有优异的高温力学性能和高温抗氧化性能, 是一种良好的高温耐磨基体材料<sup>[2-4]</sup>。向Ni<sub>3</sub>Al基体中加入硬质耐磨颗粒可实现两种材料的优势互补, 得到高温耐磨性优良的复合材料<sup>[5-6]</sup>。BKHA-2M是俄罗斯开发的一种Ni<sub>3</sub>Al基高温耐磨材料, 服役温度超过900 °C, 其高耐磨性主要通过析出大量的β-NiAl相和少量MC碳化物相来获得。BKHA-2M在850 °C时的耐磨性是T800合金的6倍, 1 000 °C时的抗氧化性是T800合金的5倍, 目前已成功应用于某型发动机涡轮叶片锯齿冠<sup>[1, 7-8]</sup>。碳化铬具有高的热硬度、良好的高温耐磨性和抗氧化性, 非常适于作为硬质增强相与Ni<sub>3</sub>Al复合<sup>[9-10]</sup>。高温耐磨性能优良的碳化铬/Ni<sub>3</sub>Al复合材料MX25C, 与传统高温耐磨材料Stellite合金相比, 具有更高的室温和高温硬度, 更优异的耐磨性能和高温抗氧化性, 并在1 000 °C具有优良的高温稳定性<sup>[11-13]</sup>。如果将碳化铬和NiAl相两种耐磨硬质相共同添加进Ni<sub>3</sub>Al基体中, 强强联合, 有望得到一种具备优异高温抗氧化性、更高硬度和耐磨性的新一代高温耐磨材料。

为此, 本研究设计了一种新型Ni<sub>3</sub>Al基高温耐磨合金, 采用熔炼铸造法引入碳化铬和NiAl相两种耐磨硬质相, 通过显微组织分析、硬度测试、高温抗氧化性能测试, 评估合金的综合性能。

## 1 试样制备与方法

采用熔炼浇注的方法制备合金锭, 主要化学成分(质量分数)为: Al 11.0%、Cr 20.0%、C 2.0%、Ni余量, Ti、W等微量元素的总量低于1%。从铸锭上切取并加工成试样, 开展组织观察、室温硬度测试和高温氧化试验。将试样研磨并抛光后,

### 作者简介:

侯杰(1990-), 男, 博士, 研究方向为高温合金材料、耐磨材料的设计及制备。  
E-mail: houjiezwei@163.com

中图分类号: TG146.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)

09-1105-04

### 收稿日期:

2022-08-22 收到初稿,

2023-07-29 收到修订稿。

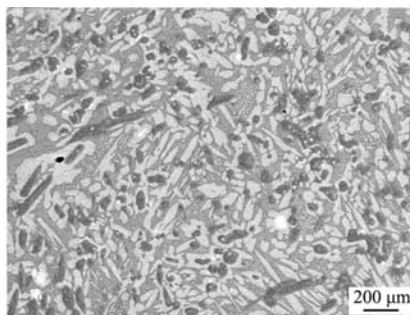
使用JSM-6480LV型扫描电镜 (SEM) 观察铸态显微组织。使用TH300型数显洛氏硬度计测量试样的室温洛氏硬度。氧化试样置于氧化铝坩埚中, 待炉温达到试验温度, 将坩埚投放到马弗炉均温区内, 100 h后出炉并立即盖上坩埚盖, 防止氧化皮外溅, 使用SEM观察试样表面与剖面显微组织。

## 2 试验结果及分析

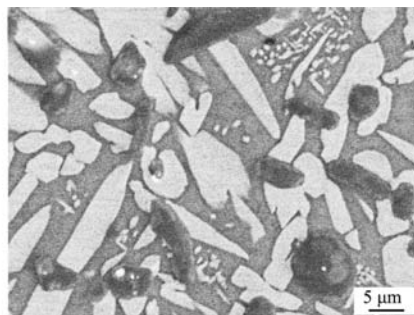
### 2.1 显微组织

使用SEM的背散射电子像观察合金的铸态组织, 如图1a所示, 可见绝大部分区域由浅灰色相和深灰色网状相组成, 大量黑色块状相和少量白色颗粒状相弥

散且均匀分布于基体中, 其中浅灰色块状相和深灰色网状相分别是 $\text{Ni}_3\text{Al}$ 和 $\text{NiAl}$ 相, 黑色块状相和白色颗粒状相分别是碳化铬和富W、Ti的MC型碳化物。从图1b所示的更高放大倍数的照片中还可以观察到一些颗粒状或麦穗状的浅灰色相, 实际也是 $\text{Ni}_3\text{Al}$ 相。使用ImagePro-Plus软件统计各相体积分数, 其中 $\text{NiAl}$ 相占38.8%、碳化铬占18.3%、MC碳化物占0.9%, 其余为 $\text{Ni}_3\text{Al}$ , 碳化铬的尺寸约为20  $\mu\text{m}$ 。以上结果说明, 通过熔炼浇注的方法不仅使得碳化铬和 $\text{NiAl}$ 相两种耐磨硬质相共存于 $\text{Ni}_3\text{Al}$ 基体中, 而且分布均匀弥散, 硬质相的体积分数总和达到58.0%, 这在现役的高温耐磨材料中是很高的。



(a) 低倍



(b) 高倍

图1 试验合金的显微组织

Fig. 1 Microstructures of the test alloy

### 2.2 硬度测试

试验合金的室温洛氏硬度测试结果为HRC51.0。文献中提到的几种现役高温耐磨材料的室温硬度值如表1所示<sup>[1, 14]</sup>。可见试验合金的硬度不仅远高于以 $\text{NiAl}$ 相为主要耐磨硬质相的BKHA-2M, 和以碳化物为耐磨硬质相的Stellite 6合金, 在常用高温耐磨材料中的硬度也很高。这是由于试验合金中的碳化铬和 $\text{NiAl}$ 两种耐磨相的室温硬度本身很高, 体积分数很可观, 加之 $\text{Ni}_3\text{Al}$ 基体作为金属间化合物, 室温硬度也很高, 叠加作用使得试验合金的硬度相当高。

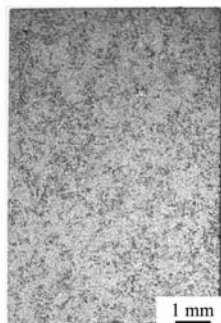
表1 几种现役高温耐磨材料的室温硬度

Table 1 Hardness of several conventional high temperature wear-resistant materials at room temperature HRC

BKHA-2M	T800	K4208	Stellite 6
36.5~40.3	52.3	46.9	39.0~43.0

### 2.3 高温抗氧化性测试

试验合金试样经过1 050  $^{\circ}\text{C}/100$  h氧化后的外观及氧化膜剥落情况如图2所示, 可见试样表面发生明显氧化, 氧化膜呈现浅灰色且存在一些暗色斑点, 并无明显剥落迹象 (图2a), 同时坩埚底部剥落的氧化物极少 (图2b), 这表明合金在宏观上的1 050  $^{\circ}\text{C}$ 抗氧化性



(a) 试样外观



(b) 坩埚底部剥落物

图2 试验合金试样经1 050  $^{\circ}\text{C}$ 氧化后的外观及氧化膜剥落情况

Fig. 2 Appearances of the specimen exposed at 1 050  $^{\circ}\text{C}$  and oxide film peeling

能非常好。使用SEM的背散射电子像模式观察氧化后试样的表面形貌, 如图3所示, 深灰色的基体是由 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 组成的复合氧化物膜, 零星分布的块状凸起实际是氧化后的碳化铬硬质相。可见即使经过1 050  $^{\circ}\text{C}/100$  h的氧化, 虽然碳化铬硬质相发生了明显氧化, 但与周围基体的结合依然良好, 并未出现大面积剥落的情况, 而且基体的氧化膜也很完好。这表明基体和硬质相在1 050  $^{\circ}\text{C}$ 都表现出优良的抗氧化性。

对于高温耐磨材料, 氧化膜与基体的结合情况对

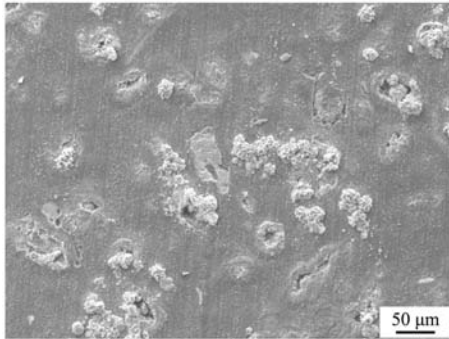
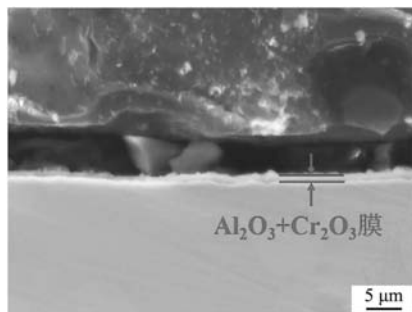
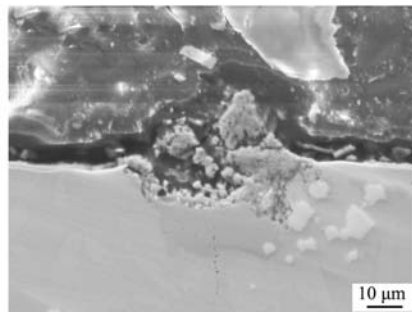


图3 经过1 050 °C/100 h氧化后试样表面氧化膜形貌  
Fig. 3 SEM morphology of surface of the specimen exposed in air at 1 050 °C for 100 h



(a) 高倍



(b) 低倍

图4 试样经过1 050 °C/100 h氧化后的剖面形貌

Fig. 4 Morphology of cross-section of the specimen exposed in air at 1 050 °C for 100 h

的方式在 $\text{Ni}_3\text{Al}$ 中引入碳化铬和 $\text{NiAl}$ 相,实现了两种耐磨硬质相的大量且均匀析出。新合金不仅室温硬度很高,而且在1 050 °C仍具有优异的高温抗氧化性,这种优势是Stellite 6、T800、K4208等传统高温耐磨材料所不具备的。从组织上看,试验合金的相组成主要有 $\text{Ni}_3\text{Al}$ 基体、 $\text{NiAl}$ 相、碳化铬,这三种相本身都具有优良的高温抗氧化性;氧化膜的主要成分 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 是高温稳定性非常好的氧化物,与基体的结合力好且不易剥落,因此保护能力强;此外,碳化铬/ $\text{Ni}_3\text{Al}$ 复合材料表面的碳化铬与 $\text{Ni}_3\text{Al}$ 基体有良好的抗氧化协同性,暴露于试样外表面的碳化铬仅部分发生氧化<sup>[13]</sup>。

一般而言,硬度越高的材料耐磨性也越好<sup>[9]</sup>;硬质相数量在一定范围内时,金属基复合材料的耐磨性将随硬质相体积分数的增加而提高<sup>[15-16]</sup>。本文中试验合金的室温硬度达到HRC51.0,硬质相体积分数高达

材料的高温抗氧化性与耐磨性都非常重要。如果氧化膜与基体的结合力差、易于剥落,则材料本身容易失去氧化膜的保护而加速氧化过程,并且剥落的氧化物还会作为磨粒加剧磨损。因此还应重点分析氧化膜与基体的结合情况。对氧化后试样的剖面进行观察,大部分区域的剖面组织如图4a所示,可见氧化膜均匀致密且与基体结合良好,厚度约为1  $\mu\text{m}$ ,基体也并无内氧化发生;碳化铬硬质相及周围区域的剖面组织如图4b所示,可见虽然碳化铬由于氧化而膨胀,但仅局限于最靠近外表面的部分,也并未继续渗入基体,而且碳化铬与基体的相界也并未由于氧化而发生开裂。

从试验结果看,采用熔炼铸造法以从液相中析出

58.0%,同时 $\text{Ni}_3\text{Al}$ 基体材料具有良好的高温力学性能和抗氧化性能,可对两种耐磨硬质相在承受高温磨损时起到很好的支撑作用,而且该合金的氧化膜与基体的结合性很好,因此可以预测该合金具备优良的高温耐磨性。综上所述,这种新合金有望成为一种能够在1 050 °C以上服役的、极具潜力的新型高温耐磨材料。

### 3 结论

(1) 采用熔炼铸造法,实现了碳化铬与 $\text{NiAl}$ 两种硬质相与 $\text{Ni}_3\text{Al}$ 材料的良好复合,制备出了一种新型 $\text{Ni}_3\text{Al}$ 基高温耐磨合金。

(2) 在本试验条件下,合金的室温硬度非常高,在1 050 °C具有优异的抗氧化性能,有望成为一种极具潜力的新型高温耐磨材料。

#### 参考文献:

- [1] 武德安. 某型航空发动机涡轮叶片叶冠接触面钎焊用耐磨块的研究及其应用 [J]. 航空维修与工程, 2015 (10): 106-110.
- [2] SIKKA V K, DEEVI S C, VISWANATHAN S, et al. Advances in processing of  $\text{Ni}_3\text{Al}$ -based intermetallics and applications [J]. Intermetallics, 2000, 8 (9-11): 1329-1337.
- [3] BUNTUNSHKIN V P, KABLOV E N, BAZYLEVA O A, et al. Alloys based on Nickel aluminides [J]. Metal Science and Heat Treatment, 1999, 41 (1-2): 36-38.

- [4] WARD-CLOSE C M, MINOR R, DOORBAR P J. Intermetallic-matrix composites-a review [J]. Intermetallics, 1996, 4 (3): 217-229.
- [5] POVAROVA K B, KAZANSKAVA N K, DROZDOV A A, et al. Physicochemical laws of the interaction of nickel aluminides with alloying elements: II. Interaction of nickel aluminides with alloying elements and/or interstitial phases [J]. Russian Metallurgy (Metally), 2007 (5): 380-386.
- [6] TALAS S. Intermetallic matrix composites [M]. Cambridge: Woodhead Publishing, 2018: 53-58.
- [7] 李尚平, 骆合力, 武德安, 等. 涡轮叶片叶冠耐磨强化用Ni<sub>3</sub>Al基MX25B高温耐磨合金研制 [C]//第十三届中国高温合金年会大摘要文集, 2015.
- [8] ABRAIMOV N V, LUKINA V V, IVANOVA A Y. Technology for the deposition of wear-resistant coatings on the airfoil shroud platforms of GTE turbine blades [J]. Russian Metallurgy (Metally), 2019 (6): 608-616.
- [9] 李尚平, 骆合力, 冯涤, 等. 碳化物特性对Ni<sub>3</sub>Al基表面强化复合材料组织与性能的影响 [J]. 材料工程, 2004 (11): 53-56.
- [10] 李尚平, 骆合力, 曹栩, 等. 新一代高温耐磨材料的设计与开发 [J]. 钢铁研究学报, 2011, 23 (s2): 553-555.
- [11] 李尚平, 骆合力, 冯涤, 等. Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>/Ni<sub>3</sub>Al复合材料的高温稳定性 [J]. 金属学报, 2007, 43 (4): 439-443.
- [12] LI S P, FENG D, LUO H L. Microstructure and abrasive wear performance of chromium carbide reinforced Ni<sub>3</sub>Al matrix composite coating [J]. Surface & Coatings Technology, 2007, 201 (8): 4542-4546.
- [13] 骆合力, 李尚平, 冯涤, 等. 碳化铬/Ni<sub>3</sub>Al复合材料的高温抗氧化性能 [J]. 航空材料学报, 2007, 27 (2): 37-41.
- [14] 刘玉珍, 桂业伟. 司太立合金的性能及应用 (I) [J]. 机械工程材料, 1992, 16 (5): 1-6.
- [15] 李尚平, 骆合力, 曹栩, 等. Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>/Ni<sub>3</sub>Al复合材料的微观组织和室温耐磨性 [J]. 2008, 37 (1): 115-118.
- [16] HU J, LI D Y, LLEWELLYN R. Computational investigation of microstructural effects on abrasive wear of composite materials [J]. Wear, 2005, 259 (1): 6-17.

---

## Microstructure and Performance of a New Ni<sub>3</sub>Al Based High-Temperature Wear-Resistant Alloy

HOU Jie, LI Shang-ping, LUO He-li

(Beijing CISRI-GAONA Materials & Technology Co., Ltd., Beijing 100081, China)

### Abstract:

According to the high temperature wear-resistant material requirement of the new generation of aero-engine blade, a new Ni<sub>3</sub>Al based high temperature wear-resistant alloy which was composited with chromium carbides and NiAl phases was designed and cast. The results of microstructure analysis, room temperature hardness test and high temperature oxidation test showed that the two wear resistant hard phases sufficiently precipitated and homogeneously distributed in the alloy. Compared to the conventional high temperature wear-resistant materials, the new alloy had high hardness at room temperature and excellent oxidation resistance at 1 050 °C, which made the alloy become an attractive potential candidate for high-temperature wear-resistant material.

### Key words:

Ni<sub>3</sub>Al; high temperature wear-resistant alloy; microstructure; hardness; oxidation resistance

---