

纳米NiAl 相对铁基合金显微组织、力学及氧化性能的影响

白亚平, 罗佳佳, 李建平, 杨忠, 郭永春

(西安工业大学 材料与化工学院, 西安 710021)

摘要: **目的** 通过机械合金化与热压烧结相结合的方法制备含有 B2 结构纳米 NiAl 相的铁基合金, 研究不同含量 (质量分数为 30%、40%、50%、60%) 的纳米 NiAl 相, 对合金显微组织及力学性能的影响。**方法** 以 Ni 粉和 Al 粉为原材料, 通过高能球磨法制备 B2 结构纳米 NiAl 粉体, 采用真空热压烧结炉将 NiAl 粉体与 Fe 粉混合烧结, 得到块体试样。采用扫描电镜 (Scanning electron microscopy, SEM) 进行微观组织观察, 采用能谱仪 (Energy dispersive spectroscopy, EDS)、X 射线衍射仪 (X-ray diffraction, XRD) 以及透射电子显微镜 (Transmission electron microscopy, TEM) 进行物相分析, 并测试不同 NiAl 含量的铁基合金的硬度、密度、室温压缩性能以及 600 °C 的抗氧化性能。**结果** 合金的硬度、抗压强度随 NiAl 含量先增后降。当 NiAl 的质量分数为 50% 时, 合金硬度为 35.2HRC, 抗压强度为 2530 MPa, 密度为 6.68 g/cm³, 较未添加 NiAl 时, 合金的抗压强度提升了 239.6%, 密度降低了 14.5%。 $\theta=600$ °C、 $t=1200$ min 时, 其表面氧化增重较纯铁降低了 37.9%, 此时 NiAl 相的尺寸约为 100~200 nm, 组织最为均匀, 致密度较高。**结论** 纳米 NiAl 相在降低铁基合金密度的同时, 能有效提升其力学性能与抗氧化性能, 但由于 B2 结构的纳米 NiAl 相为一种硬脆相, 当其含量过高时, 会极大程度地降低合金的力学性能。

关键词: NiAl/Fe 合金; 纳米 NiAl 相; 显微组织; 力学性能; 氧化性能

中图分类号: TG146.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)08-0144-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.08.019

Effect of Nano-NiAl Phase on Microstructure and Mechanical and Oxidation Properties of Fe-based Alloys

BAI Ya-ping, LUO Jia-jia, LI Jian-ping, YANG Zhong, GUO Yong-chun

(School of Materials and Chemical Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

ABSTRACT: The work aims to prepare the Fe-based alloy containing nano-NiAl phase with B2 structure by mechanical alloying and hot-press sintering and then study the effects of different nano-NiAl contents (30%, 40%, 50%, and 60%) on the

收稿日期: 2018-11-03; 修订日期: 2019-01-15

Received: 2018-11-03; Revised: 2019-01-15

基金项目: 国家自然科学基金 (51705391); 陕西省教育厅专项科学研究计划 (17JK0383); 装备预研领域基金重点项目 (6140922010301); 陕西省创新人才推进计划-科技创新团队 (2017KCT-05)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51705391); Special Scientific Research Plan of Shaanxi Provincial Department of Education (17JK0383); Equipment Pre-research Field Fund Key Projects (6140922010301), Shaanxi Creative Talents Promotion Plan-Technological Innovation Team (2017KCT-05)

作者简介: 白亚平 (1985—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为铝合金的制备和性能。

Biography: BAI Ya-ping (1985—), Female, Doctor, Associate professor, Research focus: preparation and properties of aluminum alloy.

通讯作者: 李建平 (1956—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为铁基合金设计、制备与产学研合作创新研究。邮箱: jpli0416@163.com

Corresponding author: LI Jian-ping (1956—), Male, Doctor, Professor, Research focus: preparation and properties of iron-based alloy. E-mail: jpli0416@163.com

microstructure and mechanical property of alloy. Ni powder and Al powder were used as raw materials to prepare B2 nano-NiAl powder by high-energy ball milling. The NiAl powder and Fe powder were mixed and sintered by vacuum hot-pressing sintering furnace to obtain the block sample. Scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive spectroscopy (EDS), X-ray diffraction (XRD) and transmission electron microscopy (TEM) were used to observe microstructure and analyze phases. Hardness, density, compressive strength and oxidation resistance (600 °C) of Fe-based alloys with different contents of NiAl were tested. Hardness and compressive strength of alloy increased firstly, and then decreased with NiAl content. When NiAl content was 50wt.%, hardness and compressive strength of alloy were 35.2 HRC and 2,530 MPa respectively and the density was 6.68 g/cm³. The compressive strength of the alloy increased by 239.6% and the density decreased by 14.5% when compared with those of alloy not added with NiAl. When $\theta=600$ °C and $t=1200$ min, the surface oxidation weight gain was reduced by 37.9% compared with that of pure iron. NiAl phase size was about 100~200 nm and the phase had the most uniform structure and the highest density. Nano-NiAl with B2 structure can effectively reduce the density of iron-based alloy and improve the mechanical properties. However, the mechanical properties of the alloy are greatly reduced, when NiAl content is too high, since nano-NiAl phase with B2 structure is a hard and brittle phase.

KEY WORDS: NiAl/Fe alloy; Nano-NiAl phase; microstructure; mechanical properties; oxidation properties

铁基合金的价格相对低廉, 室温与高温力学性能都十分突出, 因此被广泛应用于航空航天、冶金工业、石油化工等众多领域^[1-4]。随着科技的发展, 对设备及零部件轻量化的要求越来越高。众所周知, 铁的密度较大, 减重空间有限。同时, 一般而言, 材料的强度、硬度等总是随着材料密度的降低而降低^[5-7]。因此开发一种低密度但性能优异的材料将会对装置的轻量化有重要意义。降低合金密度的同时提高材料性能的方法有很多种, 包括向合金中添加一些低密度的合金元素以及金属间化合物, 其中 Ni-Al 系金属间化合物受到国内外研究者的广泛关注^[8-10]。Ni-Al 系金属间化合物主要包括 Ni₃Al (L12 型)、NiAl (B2 型), 它们除了具有高强度、高硬度等金属间化合物的普遍特性外, 还具有较低的密度以及较高的弹性模量和导热系数^[11-14]。

近年来, 国内外研究者对 Fe 与 NiAl 之间的交互作用做了很多研究^[15-18]。彭平等应用第一原理计算了 Fe 对 NiAl 力学性能影响, 结果表明: 无论是理想 NiAl 晶体, 还是含 Ni 空位或 Ni 反位的 NiAl 缺陷晶体, Fe 质量分数小于 0.6% 的合金化均可使其硬度大幅提高^[19], 随着铁的质量分数升至 12.5%, 铁的磁性作用上升, 可诱导 NiAl 金属间化合物的固溶软化效应^[20]。Z. K. Teng 等人利用中子衍射研究与模拟, 证实体心立方 α -Fe 基体与纳米相 B2 有序 NiAl 型析出物之间的晶格失配, 对控制沉淀强化铁素体钢的蠕变性能具有重要意义^[21-22]。Z. T. Edahiro 等人研究了含 NiAl 沉淀相的 Fe-23.0Al-6.0Ni 单晶的显微组织和力学性能, 合金在 1373 K 下均匀化后缓慢冷却至室温, 具有 B2 结构的 NiAl 相在体心立方 (bcc) Fe-Al 基体中沉淀, 满足立方体-立方体关系, 具有小的错配应变。含有 NiAl 沉淀物的单晶在室温下表现出高于 1 GPa 的高屈服应力^[23]。冷文秀等研究了 Ni-Al-Fe 体系中 NiAl/Fe 互为基体/析出相的组织特征^[24]以及 NiAl(Fe) 金属间化合物的析出强化^[25], 通过透射电镜观察确定

变形过程中位错滑移矢量为 $\langle 111 \rangle$ 。虽然 α -Fe 析出相的硬度低于 NiAl(Fe) 基体, 但由于 α -Fe 析出相对位错有较强的钉扎作用, 因此基体得到强化。2015 年韩国研究学者利用镍能在退火过程中与铝发生作用, 生成纳米尺度且耐剪切的 B2 镍铝金属间化合物, 生产了一种新型低密度钢, 这种钢比应用在众多生产领域的传统钢更坚固、更轻, 且更具有弹性^[26]。

基于上述研究, 本文通过机械合金化与真空热压烧结相结合的方法制备不同 NiAl 含量的 NiAl/Fe 合金, 探究 NiAl 增强相对铁基合金显微组织、密度、力学性能、抗氧化性能的影响, 以望制备出低密度同时性能优异的铁基合金, 扩大其应用范围。

1 实验方法

利用机械合金化制备 B2 结构的纳米 NiAl 粉体。采用 Pulverisette P5 (Germany) 型变频行星式球磨机对原子比为 1:1 的 Ni 粉和 Al 粉进行球磨。试验参数: 球料比为 10:1, 转速为 250 r/min, 转 30 min 停 30 min, 交替球磨 70 h。球磨后纳米 NiAl 粉体扫描照片及 XRD 谱图如图 1 所示。由图 1a、b 可以看出, 经过机械合金化得到的 NiAl 粉体较为细小, 颗粒表面较为圆整。在高倍下可以观察到 NiAl 相, 尺寸达到纳米级, 约为 60~100 nm, 但聚集现象严重, 颗粒表面较为光滑, 且有沟壑状纹路。从图 1c 可以看出, XRD 图谱中出现了 NiAl 相(100)、(110)、(211)面的衍射峰, 且(110)的衍射峰最强, 可以证明经机械合金化制备的粉体中 NiAl 相以 B2 结构存在。

通过热压烧结法制备块体铁基合金。采用 QQM-Y/B 型变频行星式球磨机, 在氩气保护气氛下, 对不同配比的纳米 NiAl 粉与铁粉进行球磨混合。具体试验参数: 球料比为 3:1, 转速为 100 r/min, 球磨 5 h。使用热压烧结炉 (ZT-40-20Y) 将球磨后的复

合粉体进行真空热压烧结, 单次烧结所用粉体质量为 30 g。具体工艺参数见表 1。

设计四组实验, NiAl 的质量分数分别为 30%、40%、50%、60%。将热压烧结后的块体试样经不同型号的砂纸粗磨后, 用人造金刚石研磨膏进行抛光。采用扫描电镜 (SEM, Quanta-400F) 以及透射电子显微镜 (JEM-2010) 观察其微观组织, 通过能量色散光谱仪 (EDS, INCA)

检测相的元素组成, 并用 X 射线衍射仪 (XRD, XRD-6000) 进行物相分析。采用阿基米德原理测量合金的密度。将材料制备成 4 mm×4 mm×6 mm 压缩试样, 以及 20 mm×10 mm×1.5 mm 的氧化试样, 采用电子万能拉伸试验机 (D2-0200-1) 对其进行室温压缩性能测试, 压缩速率为 1 mm/min; 采用热分析仪 (HTG-1/2) 对其进行氧化性能测试, 通气量为 50 mL/min。

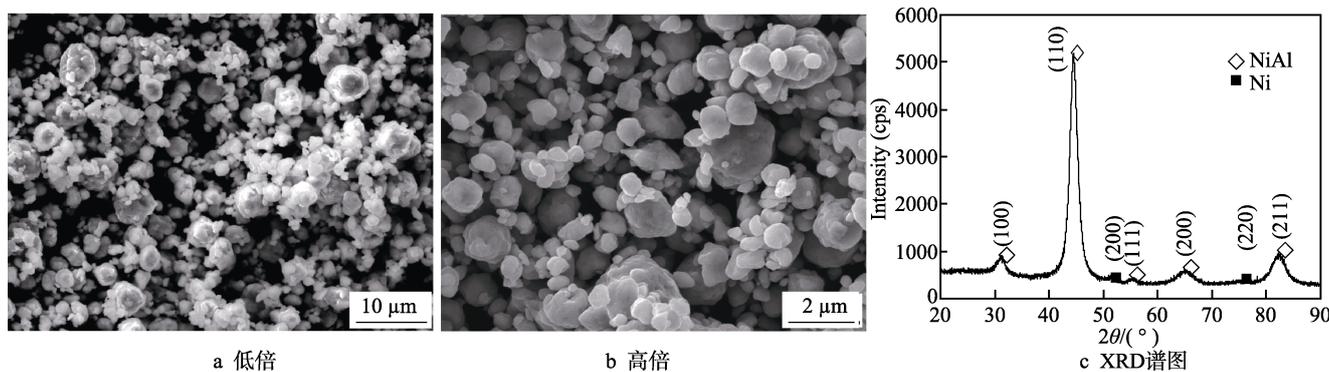


图 1 NiAl 粉体 SEM 照片及 XRD 谱图
Fig.1 SEM images and XRD patterns of NiAl powder: a) low magnification scanning; b) high magnification scanning; c) XRD patterns

表 1 热压烧结制备的纳米 NiAl 增强铁基合金的工艺参数
Tab.1 Process parameters of hot-pressed sintering nano-NiAl/Fe alloys

| Parameter name | Numerical value | Parameter name | Numerical value |
|------------------------|-----------------|--------------------------------------|-----------------|
| Pressure/MPa | 20 | Heating rate/(°C·min ⁻¹) | 3~10 |
| Mold inner diameter/mm | 30 | Holding time/min | 60 |
| Vacuum degree/Pa | 3~4 | Maximum temperature/°C | 1050 |

2 结果与讨论

2.1 物相分析

图 2 为不同纳米 NiAl 含量铁基合金块体材料的 X 射线衍射图谱。由图 2 可以看出, 未添加纳米 NiAl 增强相时, 基体中 FeO 衍射峰较强, 可知热压烧结过程中, 由于低真空的影响, 导致铁粉氧化; 加入

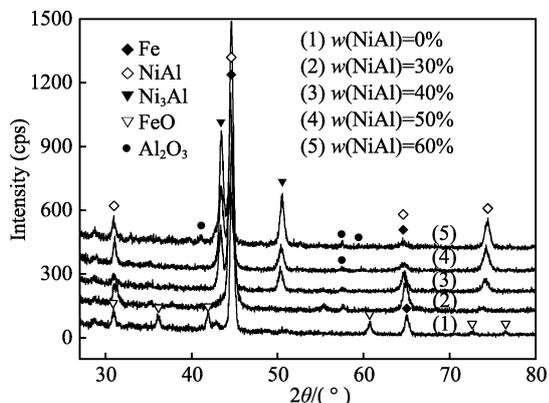


图 2 不同纳米 NiAl 含量铁基合金的 X 射线衍射图谱
Fig.2 X-ray patterns of Fe-based alloys with different nano-NiAl contents

纳米 NiAl 后, FeO 的衍射峰几乎消失。随着 NiAl 含量的增加, 合金中 NiAl 和 Ni₃Al 的衍射峰值逐渐升高。当 NiAl 的质量分数为 60% 时, 出现 Al₂O₃ 的衍射峰。

2.2 微观组织

不同纳米 NiAl 含量铁基合金块体材料的扫描照片如图 3 所示, 结合表 2 的 EDS 分析可知, 图 3 中灰白色组织为铁基体 (如点 1 所示), 灰色区域为 NiAl 相 (如点 2 所示)。当 NiAl 的质量分数为 30% 时, 合金的微观组织如图 3a 所示, 其中除灰白色铁基体与灰色区域的 NiAl 相外, 还存在着大量黑色块状物质, 其分布在基体与 NiAl 相的边界。通过能谱分析, 判断其为 FeO (如点 3 所示)。此外由于热压烧结工艺的影响, 在烧结的过程中也形成了一定量烧结孔隙。NiAl 的质量分数为 40%、50% 时, 铁基合金的微观组织如图 3b、c 所示, 与图 3a 相比, 可以明显发现 FeO 以及烧结孔隙减少。当 NiAl 的质量分数为 50% 时, FeO 与烧结孔隙几乎完全消失。此时 NiAl 增强相与铁基体的结合也更加紧密, 组织更加均匀。当 NiAl 的质量分数为 60% 时, 合金的微观组织如图 3d 所示, 通过放大观察可以发现, 在灰色区域中出现了一种浅黑色点状物质, EDS 分析 (如点 4 所示) 推断其为

Al₂O₃。通过对比四种成分的铁基合金，随着 NiAl 添加量的增加，合金中 NiAl 相逐渐增多，黑色 FeO 逐渐减少，结合图 2 的 X 射线衍射可知，NiAl 的加入可抑制 Fe 的氧化。这是由于铝元素的氧化优先于铁元素，一定程度上抑制了铁的氧化。纳米 NiAl 相的加入细化了 Fe 基体的晶粒尺寸。由铁碳相图可知，在 700 °C 以上开始有新相形成，此时铁基体开始黏性流动，而 NiAl 相为硬质相，熔点为 1638 °C，在基体中阻碍铁的运动，从而抑制了晶粒长大。

为了进一步确定图 3d 中黑色点状物质的尺寸和成分等，对其进行 TEM 测试分析。NiAl 的质量分数为 60% 时，铁基合金的透射电镜照片如图 4a 所示，可以看见大量直径为 100~200 nm 的白色块状相，结合能谱分析，进一步确定其为 Al₂O₃。粉末球磨混合环境与合金制备过程中的高温、低真空环境均使得合

金元素发生氧化。当铝含量较高时，氧化现象更为明显，这与 XRD 测试、扫描电镜分析结果相一致。结合图 3、图 4 可以看出，随着纳米 NiAl 添加量的增大，合金的微观组织逐渐均匀并且细化。当 NiAl 的质量分数为 60% 时，Al 的氧化严重，生成了大量 Al₂O₃。

表 2 不同 NiAl 含量铁基合金 EDS 分析
Tab.2 EDS analysis of Fe-based alloys with different NiAl contents

| Test point | Element/at. % | | | |
|------------|---------------|-------|-------|-------|
| | Al | Fe | Ni | O |
| 1 | 3.13 | 94.43 | 0.78 | 1.67 |
| 2 | 40.06 | 5.13 | 53.82 | 1.99 |
| 3 | 10.62 | 43.33 | 17.83 | 28.22 |
| 4 | 62.04 | 3.73 | 0.63 | 33.60 |

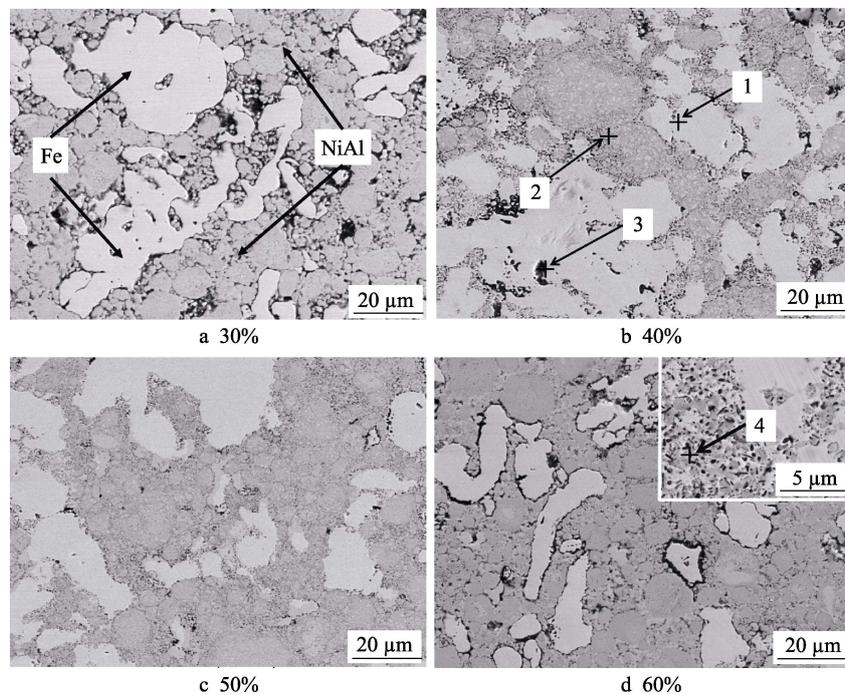


图 3 不同 NiAl 含量铁基合金扫描电镜照片
Fig.3 SEM micrographs of Fe-based alloy with different NiAl contents

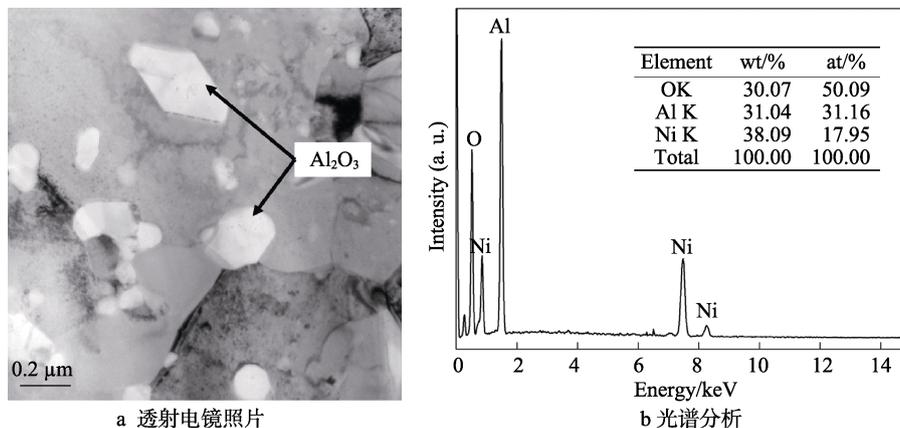


图 4 60%NiAl 增强铁基合金透射电镜照片
Fig.4 TEM micrographs of Fe-based alloy with 60%NiAl: a) Transmission picture; b) Spectral analysis

分析认为,合金中 NiAl 含量增加后,FeO 的减少与 Al 的氧化有关。由于 Al 比 Fe 更活泼, NiAl 含量增加后,氧优先与其中的铝元素发生反应,生成 Al_2O_3 。

NiAl 的质量分数为 50%的铁基合金透射电镜照片如图 5 所示,可以看出,该合金晶粒尺寸为 200~400 nm。

合金中纳米 NiAl 相选区的电镜衍射花样如图 5b 所示,从电子衍射图谱分析结果可知,烧结后的合金试样中, NiAl 相仍以 B2 型结构存在,但烧结的高温环境促使晶粒长大。通过烧结,晶粒尺寸由原来的 60~100 nm 长大至 300 nm 左右。

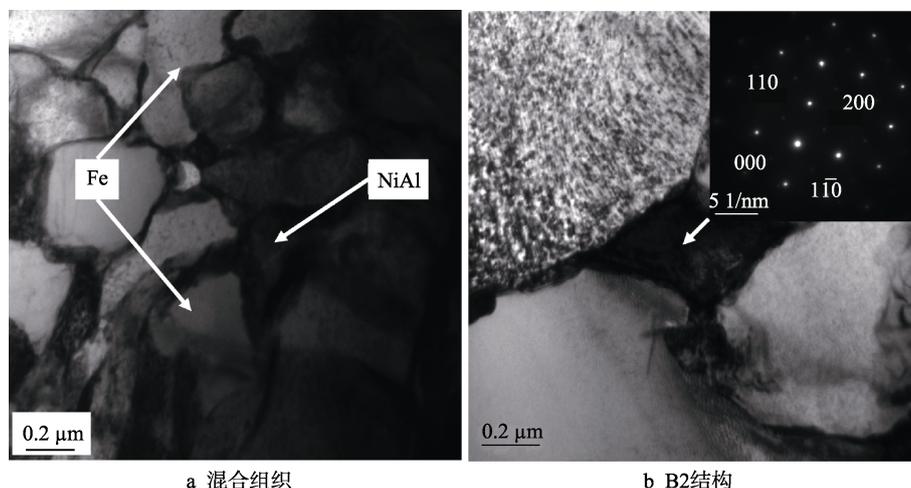


图 5 50%NiAl 增强铁基合金透射电镜照片

Fig.5 TEM micrographs of Fe-based alloy with 50% NiAl: a) Mixed microstructure; b) B2 structure

2.3 力学性能

表 3 为不同纳米 NiAl 含量铁基合金的硬度值。由表 3 可知,合金硬度随 NiAl 含量的增加,有较大幅度的增大。在 NiAl 的质量分数为 50%时,硬度达到最大值 (35.2HRC),是纯铁的 3.7 倍。

表 3 不同纳米 NiAl 含量铁基合金硬度
Tab.3 Hardness of Fe-based alloy with different nano-NiAl contents

| w(NiAl)/% | Hardness (HRC) |
|-----------|----------------|
| 0 | 9.5 |
| 30 | 27.0 |
| 40 | 31.5 |
| 50 | 35.2 |
| 60 | 32.5 |

不同纳米 NiAl 含量的铁基合金的应力-应变曲线与密度、抗压强度随 NiAl 含量的变化曲线如图 6 所示。通过对比合金密度的理论计算值与实际测量值,不同 NiAl 含量下,铁基合金的平均致密度达到 97% 以上。由图 6 可以看出,合金的密度随 NiAl 含量的增加而逐渐降低,纯铁的密度为 7.53 g/cm^3 ,当 NiAl 的质量分数为 50%时,与纯铁相比,合金的密度降低了 14.5%,达到 6.44 g/cm^3 。随着 NiAl 含量的增加,合金的抗压强度 σ_{bc} 逐渐增大,当 NiAl 的质量分数为 50%时达到最大值 (2530 MPa),较纯铁 ($\sigma_{bc}=745 \text{ MPa}$) 增加了 239.6%。当 NiAl 含量继续增加,合金 σ_{bc} 有较大程度地减小,当 NiAl 的质量分数为 60%时, $\sigma_{bc}=1501 \text{ MPa}$ 。

合金的性能与显微组织关系密切,均匀致密的组

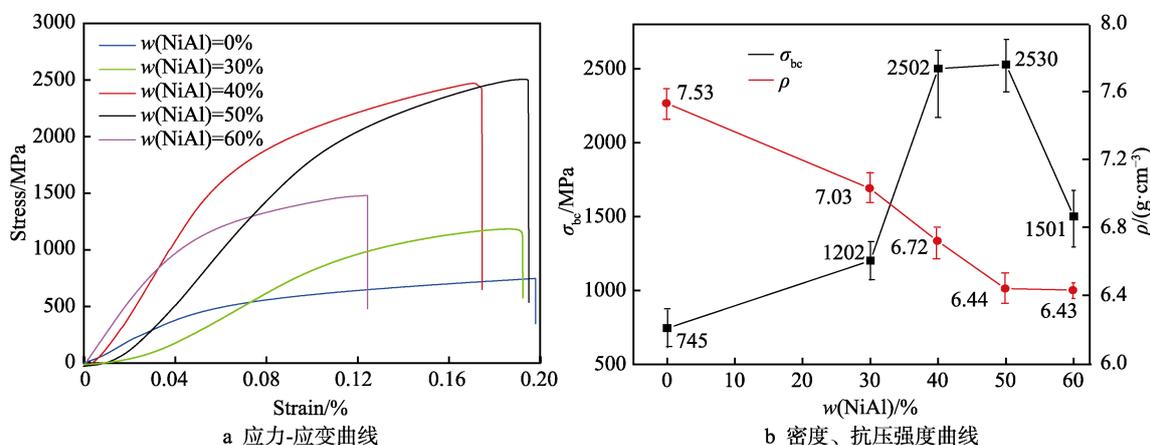


图 6 不同纳米 NiAl 含量铁基合金的应力-应变与密度、抗压强度曲线

Fig.6 Stress-strain and density, compressive strength curves of Fe-based alloys with different nano-NiAl contents: a) Stress-strain curves; b) Density and compressive strength curves

织能有效提升合金的力学性能。同时 B2 结构的纳米 NiAl 分布在基体中, 可有效强化合合金。结合图 3 可以发现, 随 NiAl 含量的增加, 合金的组织逐渐均匀细小, 因此使其 σ_{bc} 得到显著提升。纳米 NiAl 相为一种硬脆相, 铁基体塑性较好, 当纳米 NiAl 相含量较低时, 对合金力学性能的提升有较大的贡献。当纳米 NiAl 相含量较高时, 合金的脆性会显著增大, 在变形的过程中极易发生脆性断裂, 使得其抗压强度急剧降低。在 NiAl 的质量分数为 50% 左右时, 纳米 NiAl 相能最大程度地强化合合金, 同时并不会使其脆性显著增大。

同时由于 Al 在高温下长时间保温易氧化, 当合金中 NiAl 含量达到一定值后, Al 的氧化加剧也会成为影响合金性能的因素。因此存在一个合适的 NiAl 添加量, 当 NiAl 的质量分数为 50% 时, 合金在满足较低密度的同时, 又有较高的抗压强度和硬度。

2.4 抗氧化性能

NiAl 的质量分数为 50% 时, 铁基合金与纯铁的氧化增重曲线如图 7 所示。氧化温度为 600 °C, 时间为 1200 min。添加 NiAl 前后的试样质量均有一定程度的增加, 但添加纳米 NiAl 相之后, 合金的增重有很大程度的减小。在相同的实验状况下, 纯铁试样的增重达到 30 mg。NiAl 的质量分数为 50% 时, 铁基合金试样的增重为 18.64 mg, 较纯铁试样降低了

37.9%。显然纳米 NiAl 相的添加能有效阻碍铁基合金表面的氧化, 提升其抗氧化性能。经氧化增重实验后, 试样表面的截面扫描电镜图片如图 8 所示, 可以清晰地观察到合金表面的氧化层。纯铁表面的氧化层及其元素线扫描结果如图 8a、b 所示, 氧化层厚度约为 28 μm , 其中含有大量 O。NiAl 的质量分数为 50% 时, 试样表面 NiAl 相区域与 Fe 基体区域均未出现明显的氧化层, 可以看出纳米 NiAl 相提高了 Fe 基合金的抗氧化性能。这不仅是由于其降低了合金中的 Fe 含量, 与其改变了合金中的组织分布也有很大关系。

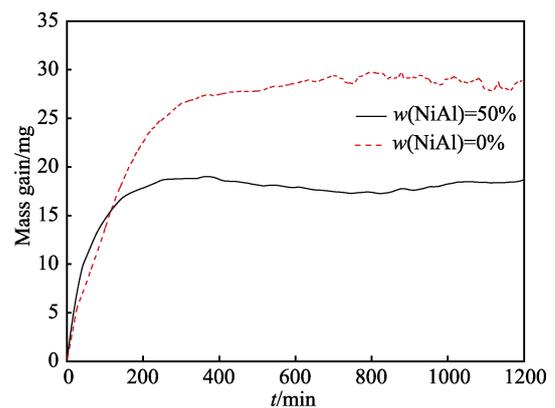


图 7 铁基合金与纯铁的氧化增重曲线
Fig.7 Oxidation weight gain curve of Fe-based alloy and pure iron

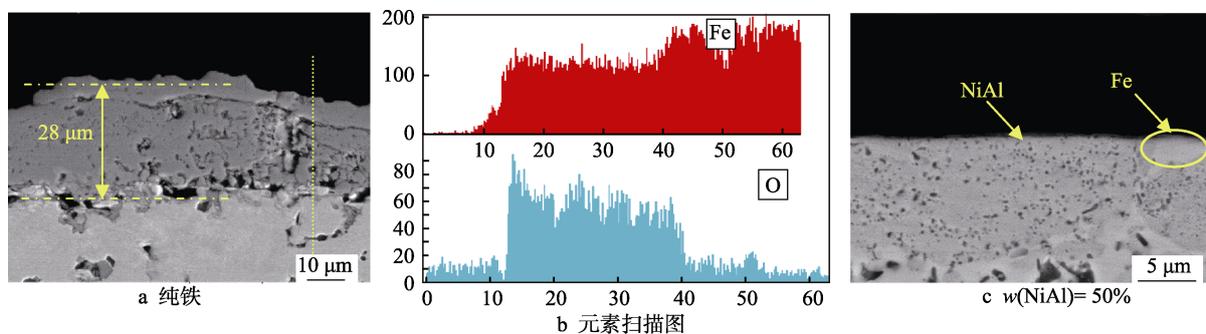


图 8 铁基合金与纯铁的氧化层
Fig.8 Oxidation layer of Fe-based alloy: a) Pure iron; b) Element line scan; c) $w(\text{NiAl}) = 50\%$

3 结论

通过机械合金化法制备 B2 结构纳米 NiAl 粉体, 并采用高能球磨与热压烧结相结合的方法制备不同纳米 NiAl 含量的铁基合金, 对合金显微组织、力学性能、表面氧化性能进行分析, 得出以下结论:

1) 热压烧结制备的 NiAl/Fe 合金中, 纳米 NiAl 相为 B2 结构, 尺寸约为 60~100 nm。当 NiAl 的质量分数为 50% 时, 铁基合金致密度较高, 显微组织最为均匀。随着纳米 NiAl 含量的继续增大, 合金中 Al 的氧化逐渐加剧。

2) NiAl/Fe 合金的硬度和抗压强度均随纳米 NiAl 含量的增加, 呈先增后降的趋势。当铁基合金

中 NiAl 的质量分数为 50% 时, 合金密度为 6.68 g/cm^3 , 硬度为 35.2HRC, 较纯铁 (9.5HRC) 增加了 270.5%, 室温抗压强度达到 2530 MPa, 较纯铁增加了 239.6%。50%NiAl 的添加使得铁基合金实现较低密度与较高力学性能的兼顾。

3) 纳米 NiAl 相显著提高了 Fe 基合金抗氧化性能, 氧化温度为 600 °C, 氧化时间为 1200 min 时, $w(\text{NiAl})=50\%$ 的铁基合金材料氧化增重较纯铁降低了 37.9%。

参考文献:

- [1] 王海涛, 张国玲, 于化顺, 等. 铬、铝、硅对铁基高温合金抗氧化性能的影响[J]. 材料工程, 2008(12):

- 73-77.
WANG H T, ZHANG G L, YU H S, et al. Effects of chromium, aluminium and silicon on oxidation resistance of Fe-base superalloy[J]. *J mater eng*, 2008(12): 73-77.
- [2] 刘杰, 潘晴川, 车物, 等. Si 含量对铁基高温合金抗氧化性能的影响[J]. *铸造技术*, 2017, 38(7): 1547-1550.
LIU J, PAN Q C, CHE C, et al. Effect of Si content on oxidation resistance of iron-based superalloy[J]. *Foundry technology*, 2017, 38(7): 1547-1550.
- [3] 邓江流, 朱允龙. 铁基高温合金的抗氧化性研究[J]. *化工管理*, 2016(27): 99-101.
DENG J L, ZHOU Y L. Study on oxidation resistance of iron-based superalloys[J]. *chemical enterprise management*, 2016(27): 99-101.
- [4] 郭建亭, 周兰章, 秦学智. 铁基和镍基高温合金的相变规律与机理[J]. *中国有色金属学报*, 2011, 21(3): 476-486.
GUO J T, ZHOU L Z, QIN X Z. Phase transformations and their mechanisms in Fe- and Ni-base superalloys[J]. *Chin j nonferrous met*, 2011, 21(3): 476-486.
- [5] SUH D W, KIM N J. Low-density steels[J]. *Scripta mater*, 2013, 68(6): 337-338.
- [6] ZARGARAN A, KIM H S, KWAK J H, et al. Effects of Nb and C additions on the microstructure and tensile properties of lightweight ferritic Fe-8Al-5Mn alloy[J]. *Scripta mater*, 2014, 89(3): 37-40.
- [7] SUTOU Y, KAMIYA N, UMINO R, et al. High-strength Fe-20Mn-Al-C-based alloys with low density[J]. *ISIJ int*, 2010, 50(6): 893-899.
- [8] 刘友成. NiAl 金属间化合物力学性质 B, P 合金化效应的计算研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
LIU Y C. NiAl intermetallic compound B, P alloying calculated with First-principles calculations[D]. Changsha: Hunan University. 2012.
- [9] ADABI M, AMADEH A A. Formation mechanisms of Ni-Al intermetallics during heat treatment of Ni coating on 6061 Al substrate[J]. *T nonferr metal soc*, 2015, 25(12): 3959-3966.
- [10] 胡雪兰, 张颖, 吕广宏. 杂质对 NiAl 金属间化合物结构及力学性能影响的研究[J]. *航空科学技术*, 2010(6): 41-45.
HU X L, ZHANG Y, LV G H. Study of structure and mechanical properties of impurity effects on NiAl intermetallics[J]. *Aeronautical science and technology*, 2010(6): 41-45.
- [11] 暴新建. Ni-Al-Fe 与 Er-Ni 体系金属间化合物的高压合成及其性质研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
BAO X J. High-pressure synthesis of Ni-Al-Fe and Er-Ni intermetallics and their properties[D]. Changchun: Jilin University, 2013.
- [12] CUI H Z, WEI N, ZENG L L, et al. Microstructure and formation mechanism of Ni-Al intermetallic compounds fabricated by reaction synthesis[J]. *T nonferr metal soc*, 2013, 23(6): 1639-1645.
- [13] 李婷婷, 彭超群, 王日初, 等. Fe-Al、Ti-Al 和 Ni-Al 系金属间化合物多孔材料的研究进展[J]. *中国有色金属学报*, 2011, 21(4): 784-795.
LI T T, PENG C Q, WANG R C, et al. Research progress in porous Fe-Al, Ti-Al and Ni-Al intermetallic compound porous materials[J]. *Chin j nonferrous met*, 2011, 21(4): 784-795.
- [14] ZADOROZHNY Y V, KALOSHKIN S, TCHERDYN-TSEV V, et al. Formation of intermetallic Ni-Al coatings by mechanical alloying on the different hardness substrates[J]. *J alloy compd*, 2014, 586(6): 373-376.
- [15] 吕柏林. 镍基合金及镍铝金属间化合物的结构与性能的第一性原理研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
LU B L. First principles study on structure and properties of nickel-base alloys and NiAl intermetallics[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.
- [16] REN X, ZHOU W L. Formation and growth kinetics of intermediate phases in Ni-Al diffusion couples[J]. *J wuhan univ technol*, 2009, 24(5): 787-790.
- [17] 张迪, 单际国, 陈武柱, 等. Fe 对 NiAl 金属间化合物光束堆焊层成形及组织结构的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2006, 35(1): 5-8.
ZHANG D, SHAN J G, CHEN W Z, et al. Effect of Fe on the formation of NiAl intermetallic light beam surfacing layer and its microstructure[J]. *Rare metal mat eng*, 2006, 35(1): 5-8.
- [18] XING H, WEN Y, HUANG J, et al. Effect of Fe ternary addition on ductility of NiAl intermetallic alloy[J]. *Rare metals*, 2011, 30(1): 316-319.
- [19] 陈律, 彭平, 湛建平, 等. Fe 对 B₂-NiAl 力学性能影响的第一原理计算[J]. *稀有金属材料与工程*, 2010, 39(2): 229-233.
CHEN L, PENG P, ZHAN J P, et al. First-principles calculation on mechanical properties of B₂-NiAl intermetallic compound with Fe addition[J]. *Rare metal mat eng*, 2010, 39(2): 229-233.
- [20] 姚强, 黄健, 孙坚. 富镍 NiAl 金属间化合物磁性诱导固溶软化效应[J]. *金属学报*, 2008, 44(5): 521-523.
YAO Q, HUANG J, SUN J. Solid solution softening effect of the intermetallics Ni-rich NiAl induced by magnetism[J]. *Acta metall sin*, 2008, 44(5): 521-523.
- [21] TENG Z K, LIU C T, MILLER M K, et al. Room temperature ductility of NiAl-strengthened ferritic steels: Effects of precipitate microstructure[J]. *Mat sci eng: A*, 2012, 541(4): 22-27.
- [22] TENG Z K, GHOSH G, MILLER M K, et al. Neutron-diffraction study and modeling of the lattice parameters of a NiAl-precipitate-strengthened Fe-based alloy[J]. *Acta mate*, 2012, 60(13-14): 5362-5369.
- [23] EDAHIRO T, KOUZAI K, YASUDA H Y. Mechanical properties and hardening mechanism of Fe-Al-Ni single crystals containing NiAl precipitates[J]. *Acta mater*, 2013, 61(5): 1716-1725.
- [24] 冷文秀, 田文怀. Ni-Al-Fe 中 NiAl/Fe 互为基体/析出相的组织特征[J]. *稀有金属*, 2009, 33(2): 185-190.
LENG W X, TIAN W H. Precipitation characteristics by/in NiAl/Fe taken as matrix/precipitate in Ni-Al-Fe system[J]. *Rare metals*, 2009, 33(2): 185-190.
- [25] 冷文秀, 田文怀. Ni-Al-Fe 系中 NiAl(Fe)金属间化合物的析出强化[J]. *稀有金属材料与工程*, 2010, 39(3): 460-463.
LENG W X, TIAN W H. Precipitation hardening of NiAl(Fe) intermetallic compounds in Ni-Al-Fe system[J]. *Rare metal mat eng*, 2010, 39(3): 460-463.
- [26] KIM S H, KIM H, KIM N J. Brittle intermetallic compound makes ultrastrong low-density steel with large ductility[J]. *Nature*, 2015, 518(7537): 77.
- [27] 牛艳萍, 赵禹凯, 王顺成, 等. Si 含量对 Al-Si-Mg 合金铸造流动性、热导率和力学性能的影响[J]. *铸造*, 2016, 65(4): 366-370.
NIU Y P, ZHAO Y K, WANG S C, et al. Effects of Si content on casting fluidity, thermal conductivity and mechanical properties of Al-Mg-Si alloy[J]. *Foundry*, 2016, 65(4): 366-370.