DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.05.006

CrCoNiMn 多元固溶强化铁基合金的组织与力学性能

张　涛,赵荣达,方　正,伍复发
(辽宁工业大学 材料科学与工程学院,辽宁 锦州 121000)

摘　要:研究了 $Fe_{100-x}(CoCrNiMn)_x$ 合金的微观组织,相结构,断口形貌和力学性能。结果表明,随合金中固溶元素 CoCrNiMn 含量的降低,金相组织为枝晶和枝晶间,但树枝晶上分布的板条状结构增多。合金的相结构均为 BCC 相结构。此外,合金的力学性能出现先下降后升高的变化规律,具有良好伸长率的试样断口为典型的韧窝状,且韧窝数量多,尺寸小,衬度深。

关键词:$Fe_{100-x}(CoCrNiMn)_x$ 合金;微观组织;力学性能

中图分类号:TG113　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)05-0454-03

Microstructure and Mechanical Properties of CrCoNiMn Multivariate Solid Solution Reinforced Fe-based Alloys

ZHANG Tao, ZHAO Rongda, FANG Zheng, WU Fufa
(School of Materials Science and Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121000, China)

Abstract: The microstructure, phase structure, fracture morphology and mechanical properties of Fe_{100-x} $(CoCrNiMn)_x$ alloys were investigated. The results show that with the decrease of CoCrNiMn content, microstructure are dendrites and interdendritic, but the distribution of lath structures on dendrites is increased. The metallographic structure changes from dendritic to dendritic matrix with lath structure; the phase structure of the alloys is still body-centered cubic (BCC) phase structure. In addition, the yield strength and ultimate tensile strength of the alloys are decreased firstly and then increased. A large number of small and deep dimples are observed in the fracture of the samples with good elongation.

Key words: $Fe_{100-x}(CoCrNiMn)_x$ alloy; microstructure; mechanical properties

高强度且兼有良好韧性的材料一直是金属材料研究的热点。在 2004 年,叶均蔚等人提出了一种新型的合金设计理念,即高熵合金[1,2],高熵效应导致合金倾向于形成相结构简单的 FCC、BCC 或者是 HCP 相的固溶体[3-5]。近期,Li 等人将“亚稳工程”引入高熵合金,降低高熵效应,目的是降低高温相与室温相的稳定性;晶粒细化后的 Fe50Mn30Co10Cr10 DP-HEA 强度和延展性得到很大提升[6]。同样,Lu 等人引入共晶高熵合金(EHEAs)概念[7,8],将 HEA 中高强度 BCC 相和高延展性 FCC 相结合,AlCoCrFeNi2.1 EHEA 兼有高强度与良好延展性。本文在五元 FeCoCrNiMn 高熵合金的基础上,通过改变合金元素含量,降低高熵效应,得到了具有单一 BCC 结构,强度较高且兼有良好延展性的合金体系,并研究了合金的微观组织与力学性能。

收稿日期:2018-12-04

作者简介:张　涛(1995-),安徽蚌埠人,硕士研究生.高熵合金的力学行为研究.电话:15941669425,
E-mail:15941669425@163.com

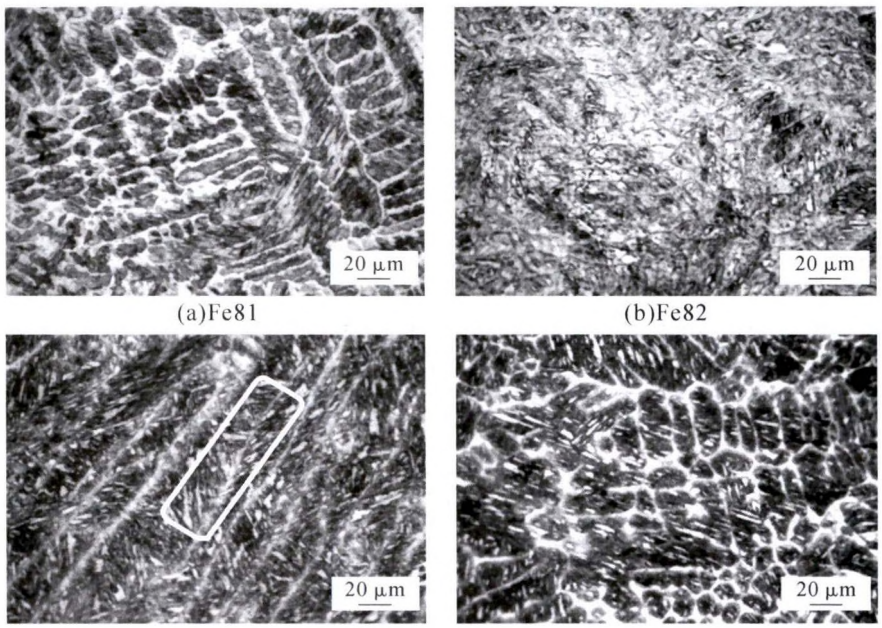
1　实验材料与方法

为避免杂质的影响,选用纯度为 99.99%的高纯 Co、Cr、Fe、Ni、Mo 纯金属,通过 WK-Ⅱ型真空电弧熔炼炉制备了 Fe_{100-x} $(CoCrNiMn)_x$ 合金,(x=13,14,15,16,17,18,19;以下依次简称为:Fe81,Fe82,Fe83,Fe84,Fe85,Fe86,Fe87)系高熵合金,其中 Mn 元素多加 30%的烧损量。为了确保各元素混合的化学均匀性,铸态合金棒通过 4 次以上反复熔炼制备得到。骨状拉伸试样尺寸为 10 mm×1 mm×1 mm。利用 CMT5305 试验机进行速率为 0.2 mm/min 的准静态单轴拉伸试验。利用光学显微镜(Axio Verb.A1)和扫描电子显微镜(S-3000N)分别观察了铸态合金的金相组织和拉伸断口;合金的相结构通过 X 射线衍射仪(D/max-2500/PC)进行测定。

2　实验结果与分析

2.1　组织与成分

图 1 为 $Fe_{100-x}(CoCrNiMn)_x$ 合金的金相组织。结



(a)Fe81　(b)Fe82

(c)Fe86　(d)Fe87

图 1 $Fe_{100-x}(CoCrNiMn)_x$ 合金的金相组织

Fig.1 Microstructure of $Fe_{100-x}(CoCrNiMn)_x$ alloy

果表明：Fe81 与 Fe82 合金的微观组织形貌均为枝晶和枝晶间；随着 Fe 含量的增加，Fe86 与 Fe87 合金组织中可以明显看出树枝晶基体上出现了片层状或板条状组织，其中发现板条状组织分布于枝晶内和横穿枝晶间，且轮廓清晰(图 c 标注框所示)，形成了两种组织并存的形貌。

图 2 为 Fe_{100-x} $(CoCrNiMn)_x$ 合金的 XRD 图谱。随 Fe 含量升高，合金始终为单一的体心立方(BCC)结构，未发生相结构的改变。分析认为，枝晶上的板条状结构可能是由基体通过马氏体转变而来，其组织结构并未发生变化。

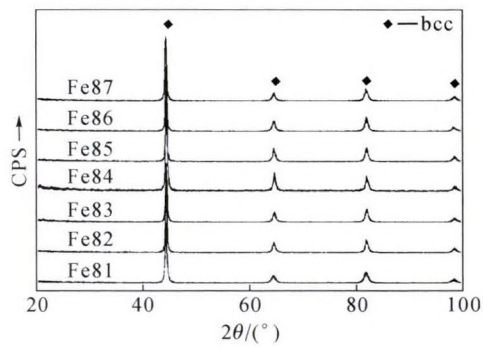


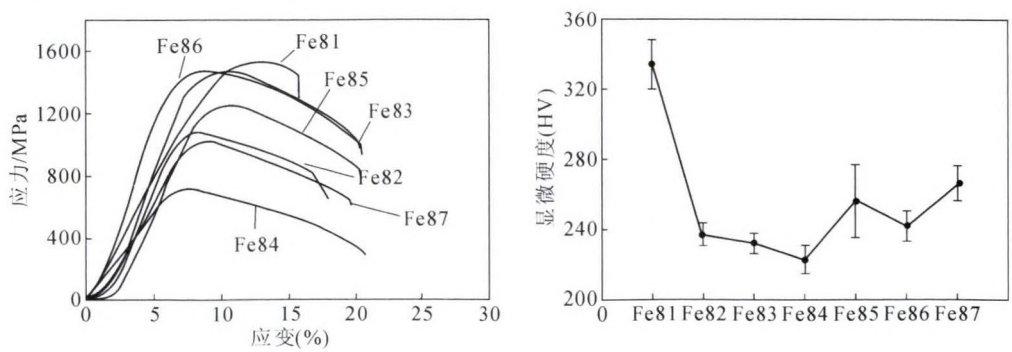
图 2 $Fe_{100-x}(CoCrNiMn)_x$ 合金的 XRD 谱图

Fig.2 XRD patterns of $Fe_{100-x}(CoCrNiMn)_x$ alloy

2.2　力学性能

力学性能变化规律如图 3 所示。从图 3 中看出，Fe 含量在 81%时，合金的抗拉强度，屈服强度均为最高水平，抗拉强度达到约 1 550 MPa，相应的伸长率较低。随着固溶原子 CoCrNiMn 含量的降低，成分降低初始，固溶强化效果降低，Fe84 合金的强度降至最低，降至 730 MPa；之后合金的强度开始升高，含量在 3.25at%时，抗拉强度升高至 1 475 MPa。通过对不同成分合金的硬度测量结果表明（如图 3b)，随 Fe 含量的升高，合金的硬度整体上呈现先降低后增加的变化规律。

通过扫描电子显微镜对形变后试样的断口进行



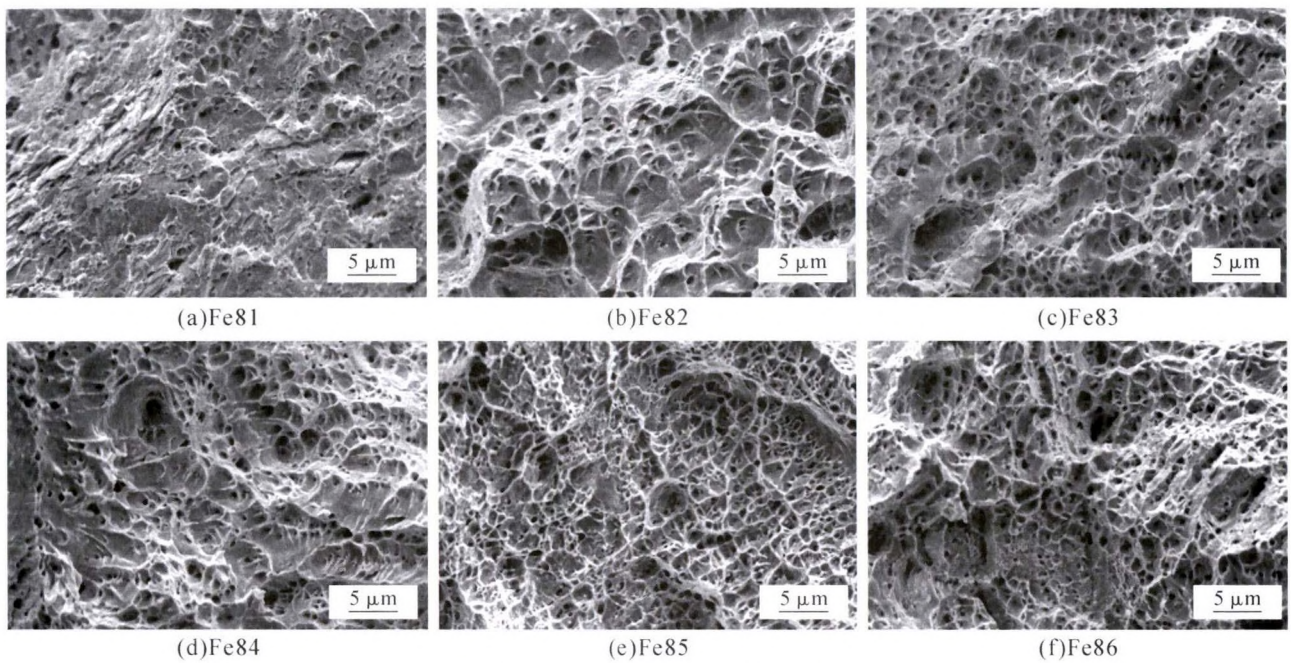
(a)应力-应变曲线　(b)显微硬度

图 3 $Fe_{100-x}(CoCrNiMn)_x$ 合金的力学性能

Fig.3 Mechanical properties of $Fe_{100-x}(CoCrNiMn)_x$ alloy

了观察，实验结果如图 4 所示。结果表明，在伸长率较低的 Fe81 合金的断口观察出存在韧窝结构，且韧窝的数量较少，深度较浅；而其他合金断口形貌则存在大量的韧窝，且韧窝的尺寸小，衬度深，分布密集；因此，结合材料力学性能，可以得出此类合金在宏观上为韧性断裂，具有良好的伸长率。

综上，通过成分调控，合金具有优良的力学性能。随着 CoCrNiMn 含量降低，组织结构均为 BCC 结构，固溶强化效果降低，合金的强度下降；达到一定成分后，枝晶中出现由马氏体转变而来的组织在变形过程中与基体的交互作用大大提高了合金的抗拉强度和伸长率。同时，元素 CoCrNiMn 含量的降低也减少了合金的制备成本。



(a)Fe81　(b)Fe82　(c)Fe83

(d)Fe84　(e)Fe85　(f)Fe86

图 4 $Fe_{100-x}(CoCrNiMn)_x$ 合金的断口形貌

Fig.4 Fracture surface of $Fe_{100-x}(CoCrNiMn)_x$ alloy

3 结论

(1)在该系列合金成分范围内，随着 Fe 含量的升高，合金的微观组织中树枝晶结构上出现片状或板条状组织，且相结构与枝晶和枝晶间一致，均为 BCC 结构。

(2)在力学性能上，元素 CoCrNiMn 含量的降低，合金的强度和硬度呈现先下降后升高的趋势，而伸长率逐渐增加，其断裂方式未发生明显改变，均为韧性断裂。

参考文献：

[1] Yeh J W, Chen S K, Lin S J, et al. Nanostructured high-entropy alloyswith multiple principal elements: Noval alloy design concepts andoutcomes[J]. Adv Eng Mater, 2004,6 (5): 299-303.

[2] 张勇. 非晶和高熵合金[M]. 北京：科学出版社，2010.

[3] Jang M J, Praveen S, Sung H J, et al. High-temperature tensile deformation behavior of hot rolled CrMnFeCoNi high-entropy alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 730: 242-248.

[4] Wang S P, Xu J. TiZrNbTaMo high-entropy alloy designed for orthopedic implants: As-cast microstructure and mechanical properties[J]. Materials Science and Engineering C, 2017, 73: 80-89.

[5] Feuerbacher M Heidelmann, Thomas M, C. Hexagonal high-entropy alloys[J]. Mater. Res. Lett, 2015, 3(1): 1-6.

[6] Li Z, Pradeep K G, Deng Y, et al. Metastable high-entropy dual-phase alloys overcome the strengtheductility trade-off [J]. Nature, 2016, 534(7606): 227-230.

[7] Lu Y, Dong Y, Guo S, et al. A promising new class of high-temperature alloys: eutectic high-entropy alloys [J] Sci. Rep, 2014, 4: 6200.

[8] 卢一平. 一类有希望的合金:共晶高熵合金 // 第三届全国电磁冶金与强磁场材料科学会议学术论文集[C]. 中国金属学会电磁冶金与强磁场材料科学分会:中国金属学会, 2016.

欢迎到当地邮政局(所)订阅 2019 年《铸造技术》杂志

国内邮发代号:52-64　国外发行号:M855　国内定价:18 元/本　海外定价:18 美元/本