

# Ti 含量对脱氧剂 45%Al-Fe-3%RE 合金铸态组织与硬度的影响

范秀风<sup>1</sup>, 闫永旺<sup>2</sup>, 陈义胜<sup>2</sup>, 宋 巍<sup>2</sup>

(1. 内蒙古科技大学分析测试中心, 内蒙古包头 014010; 2. 内蒙古科技大学材料与冶金学院, 内蒙古包头 014010)

**摘要:** 采用中频感应真空熔炼炉制备含Ti的脱氧剂45%Al-Fe-3%RE合金, 并借助X射线、扫描电镜、能谱分析和硬度检测仪对合金铸态组织及硬度进行分析。结果表明, 随着Ti含量(0, 0.2%, 0.3%, 0.4%, 0.5%)的增加, 合金中的铸态组织晶粒得到明显的细化, 并且组织更加致密; 当Ti含量为0.3%时, 合金的硬度最大, 硬度值为HV 95。

**关键词:** 脱氧剂; 45%Al-Fe-3%RE合金; 铸态组织; 硬度

## 作者简介:

范秀风(1973-), 女, 讲师, 研究生, 研究方向为稀土功能材料。电话: 0472-5288192, E-mail: fxf\_tt@163.com

## 通讯作者:

闫永旺, 男, 副教授。E-mail: yanyongwang88@163.com

中图分类号: TG172

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2019)03-0254-04

## 基金项目:

内蒙古自治区高等学校科学研究项目(NJZY17170); 内蒙古自然科学基金项目(2017MS0533); 内蒙古科技大学创新基金科研启动项目(2014QDL050)。

## 收稿日期:

2018-10-29 收到初稿,

2018-12-07 收到修订稿。

复合脱氧剂<sup>[1-3]</sup>中的稀土铝铁合金对钢有较好的脱氧效果(吨钢消耗稀土铝铁合金为5.35 kg, 脱氧率达到95.72%), 夹杂物容易去除, 仅有少量稀土残留在钢液中, 成本较低<sup>[4-5]</sup>, 得到广泛应用。但铝铁合金<sup>[6-8]</sup>中Fe在铝中的固溶度很低, 一旦超过固溶极限便容易在铸造铝合金中形成质脆的针状或片状铁相, 这些粗大的针状或针片状Al<sub>3</sub>Fe相分布在基体中, 严重割裂基体, 降低合金的力学性能<sup>[9]</sup>。为了保持铝铁合金的强化性能, 细化铝铁合金组织, 一些学者和专家<sup>[10-17]</sup>研究发现, 在铝铁合金中加入一定量的合金元素后, 可提高铝铁合金的性能, 提高其脱氧能力。作者研究了不同Ti含量(0~0.5%)对45%Al-Fe-3%RE合金组织及硬度的影响, 为实际生产提供理论依据。

## 1 试验材料与方法

试验以工业铝粒和工业纯铁、金属铈等为原料。45%Al-Fe-3%RE-Ti(0, 0.2%, 0.3%, 0.4%, 0.5%)合金的化学成分控制范围见表1。

稀土铝铁合金炉料按计算的比例称量配好后放入刚玉坩埚中, 将刚玉坩埚放入10 kg真空感应炉中进行真空熔炼。当铝铁合金熔化后, 添加不同含量的金属钛制取试样。根据Ti含量的不同, 试样编号为1<sup>#</sup>~5<sup>#</sup>。在试验中, 利用QUANTA 400型扫描电镜(SEM)、能谱分析(EDS)、X射线衍射(XRD)、硬度仪等检测手段, 对含钛元素的稀土铝铁合金组织及硬度进行检测。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 合金的相结构

图1为不同Ti含量的稀土铝铁合金的X射线衍射图谱。由图1可知, 不添加Ti的45%Al-Fe-3%RE合金由FeAl<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>、稀土铝铁相三相组成。随着Ti含量的加入, 出现了钛铝铁相。由于加入Ti元素的量较少, 在2<sup>#</sup>样品的衍射图谱中钛铝铁相的衍射峰不明显。当Ti含量大于0.3%时, 可以清晰看到钛铝铁相的衍射峰, 而且当Ti含量为0.3%时, 钛铝铁相的衍射峰强度最高。

表1 45%Al-Fe-3%RE-Ti (0, 0.2%, 0.3%, 0.4%, 0.5%) 合金的化学成分  
Table 1 Chemical composition of 45%Al-Fe-3%RE-Ti (0, 0.2%, 0.3%, 0.4%, 0.5%) alloy

试样号	C	Si	Ce	Al	Fe	Ti
1#	<0.1	<1.0	3	45	52.0	0
2#	<0.1	<1.0	3	45	51.8	0.2
3#	<0.1	<1.0	3	45	51.7	0.3
4#	<0.1	<1.0	3	45	51.6	0.4
5#	<0.1	<1.0	3	45	51.5	0.5

### 2.2 微观组织形貌

图2为不同Ti含量下45% Al-Fe-3%RE合金的SEM背散射图像。由图2中试样SEM观察发现，加入Ti元素的试样中，FeAl<sub>3</sub>相多为大片状；而随着Ti含量的增加，Fe<sub>2</sub>Al<sub>3</sub>相的片层状间距逐渐减少，且Fe<sub>2</sub>Al<sub>3</sub>相的片层状更加致密，稀土铝铁相的分布更为均匀。随着Ti含量的增加，组织更加致密，这是因为Ti与少量的C、O有比较强的结合力，在凝固过程中Ti元素优先与C元素形成稳定的TiC，其充分起到了形核剂作用，从而细化了铸态组织，晶粒得到细化。从图2可以推断出，45% Al-Fe-3%RE-Ti (0, 0.2%, 0.3%, 0.4%, 0.5%) 合金在结晶时，稀土和Ti元素聚集在富铁区附近，阻碍了铁原子的迁移，改变了原本铝铁合金的组织结构。加入稀土和Ti元素后，初生FeAl<sub>2</sub>相将基体FeAl<sub>3</sub>割裂，在合金中形成FeAl<sub>2</sub>与FeAl<sub>3</sub>的共晶相Fe<sub>2</sub>Al<sub>3</sub>相，同时随着稀土和Ti的加入，初生相FeAl<sub>2</sub>消失了<sup>[18]</sup>。董福宇的研究也表明含Ti量在0.3%时对铝铁合金组织的细化效果最好<sup>[19]</sup>。由于一定量稀土的存在，也增加了细化效果。

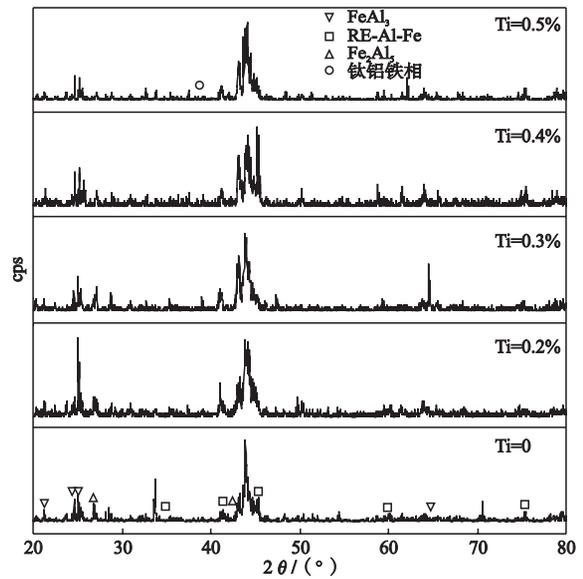


图1 45%Al-Fe-3%RE-Ti (0, 0.2%, 0.3%, 0.4%, 0.5%) 合金的X射线衍射图

Fig. 1 X-ray diffraction patterns of 45%Al-Fe-3%RE-Ti (0, 0.2%, 0.3%, 0.4%, 0.5%) alloy

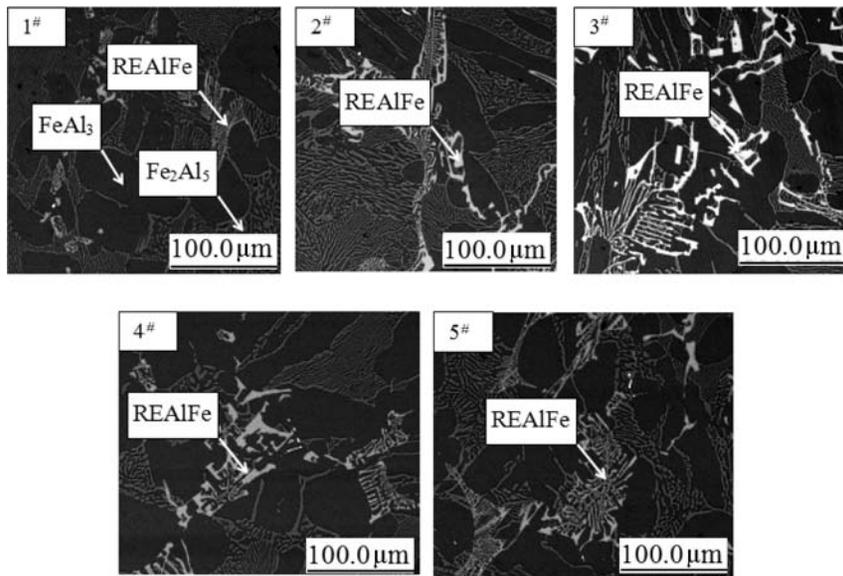


图2 45%Al-Fe-3%RE-Ti (0, 0.2%, 0.3%, 0.4%, 0.5%) 合金的SEM图像  
Fig. 2 SEM images of 45%Al-Fe-3%RE-Ti (0, 0.2%, 0.3%, 0.4%, 0.5%) alloy

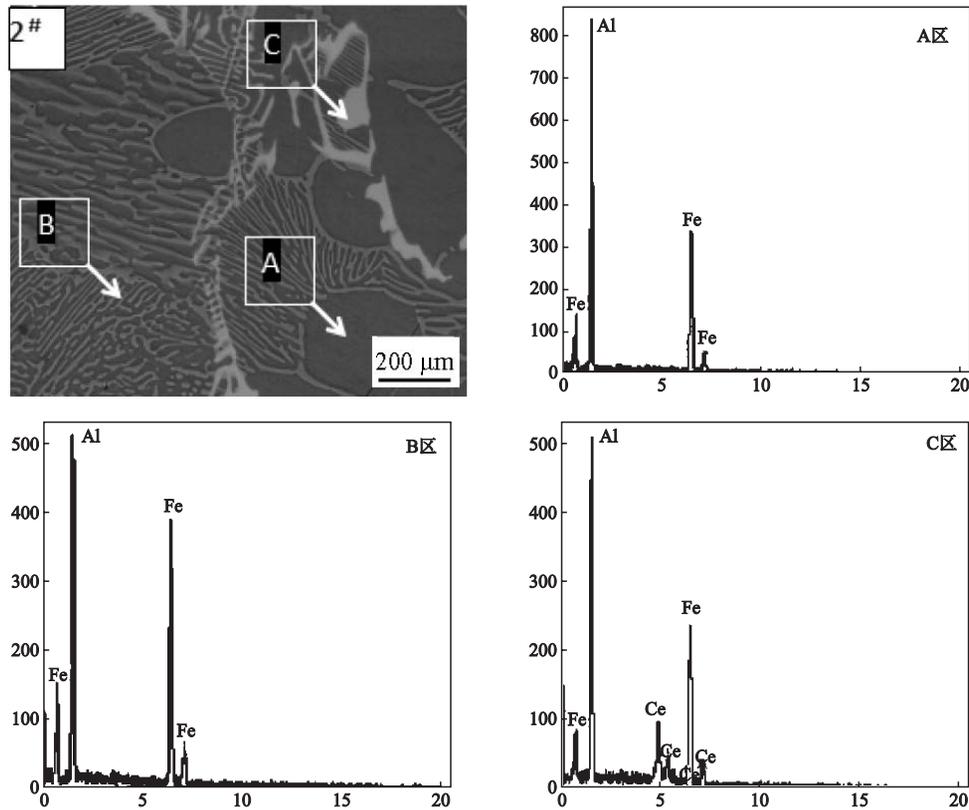


图3 含Ti量为0.2%的45%Al-Fe-3%RE的SEM照片及EDS  
Fig. 3 SEM image and EDS analysis of 45%Al-Fe-3%RE alloy with Ti=0.2%

### 2.3 电镜扫描与能谱分析

图3为含Ti量为0.2%的45%Al-Fe-3%RE合金的电镜扫描背散射图及能谱图。依据合金的背散射形貌及能谱分析可以清楚地看出，含Ti量为0.2%的45%Al-Fe-3%RE合金是由A、B、C三项组成。根据能谱图和铝铁合金二元相图分析A相区域可初步确定为 $\text{FeAl}_3$ 。B相区域的能谱含有Al、Fe和稀土元素，故确定为稀土铝铁相。根据能谱图和铝铁合金二元相图分析可初步确定C相为 $\text{Fe}_2\text{Al}_5$ 。由于加入的Ti含量较少，在进行扫描电镜照片和能谱分析时都未能清晰地捕捉到钛铝铁相。

### 2.4 硬度分析

表2是不同Ti含量下45%Al-Fe-3%RE合金的硬度值。从表2可知，45%Al-Fe-3%RE合金的硬度值随着Ti含量的增加先增大后减小，当Ti含量为0.3%时，45%Al-Fe-3%RE合金的硬度值最大，为HV 95，这也与XRD衍射结果相一致。

## 3 结论

(1) 在45%Al-Fe-3%RE合金中，不添加Ti的45%Al-Fe-3%RE合金由 $\text{FeAl}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{Al}_5$ 、稀土铝铁相三相组成。随着Ti含量(0, 0.2%, 0.3%, 0.4%, 0.5%)的增加，合金中出现钛铝铁相；在Ti含量为0.3%时，钛铝铁相衍射峰强度最强。

表2 不同Ti含量下45%Al-Fe-3%RE合金的硬度值  
Table 2 Hardness values of 45%Al-Fe-3%RE-Ti  
(0, 0.2%, 0.3%, 0.4%, 0.5%) alloy

含Ti量/%	硬度值HV
0	85
0.2	93
0.3	95
0.4	94
0.5	86

(2) 加入Ti元素的45%Al-Fe-3%RE试样中,  $FeAl_3$ 相多为片状,  $Fe_2Al_5$ 相为层状。而随着Ti含量的增加,  $Fe_2Al_5$ 相的片层间距逐渐减少, 且 $Fe_2Al_5$ 相的片层状更加致密, 并且稀土铝铁相的分布也更为均匀。

(3) 45%Al-Fe-3%RE合金的硬度值随着Ti含量的增加先增大后减小。当Ti含量为0.3%时, 45%Al-Fe-3%RE合金的硬度值最大, 为HV 95。

#### 参考文献:

- [1] 李双江, 李阳, 李杰, 等. 炼钢用脱氧剂的性能及应用现状 [J]. 河北冶金, 2014 (10): 45-48.
- [2] 范秀风, 赵旭, 闫永旺, 等. Ti含量对新型脱氧剂Al-Fe合金组织及粉化的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2013, 33 (4): 310-311.
- [3] 石云飞, 宋留建. 硅铝铁合金粉化研究 [J]. 铁合金, 2014 (4): 28-30.
- [4] 刘磊. 炼钢复合脱氧剂铝硅铁合金试制与应用试验 [J]. 钢铁, 1992 (8): 26-29.
- [5] 张怀嵩. 复合脱氧剂在炼钢终脱氧中的应用 [J]. 工业加热, 2004 (6): 62-63.
- [6] LIU Bo, YUAN Xiaoguang, HUANG Hongjun. Microstructure and mechanical properties of hypereutectic Al-Fe alloys prepared by semi-solid formation [J]. China Foundry, 2011, 8 (4): 424-431.
- [7] BAN Chunyan, ZHANG Jianfeng, QIAN peng, et al. Morphology and distribution of  $Al_3Fe$  phase in hypereutectic Al-Fe alloy solidified under magnetic field [J]. China Foundry, 2011, 8 (4): 386-391.
- [8] 向青春, 王静媛, 周振平, 等. 铝铁合金的研究进展与应用状况 [J]. 铸造, 2006, 55 (9): 875-879.
- [9] 彭帅, 陈乐平, 周全. Al-Fe合金凝固组织细化研究新进展 [J]. 铸造技术, 2013, 34 (5): 523-526.
- [10] 周振平, 李荣德, 马建超, 等. Co对Al-5%Fe合金铸态组织的影响 [J]. 材料工程, 2005 (2): 54-58.
- [11] 马德超, 李荣德, 周振平, 等. Ca对过共晶Al-5%Fe合金富铁相形态和分布的影响 [J]. 铸造, 2004, 53 (2): 110-113.
- [12] 马德超, 李荣德, 周振平, 等. Mg对共晶Al-2%Fe合金显微组织的影响 [J]. 材料科学与工程, 2006, 14 (1): 57-59.
- [13] 周振平, 李荣德, 马建超, 等. Cr对Al-5%Fe合金中初生相形貌的影响 [J]. 材料工程, 2006 (1): 20-23.
- [14] 杨伟刚, 王快社, 周龙海, 等. Ni元素和变质剂对亚共晶铝铁合金组织的影响 [J]. 热加工工艺, 2013 (7): 4-7.
- [15] 李德荣, 马建超, 周振平, 等. 混合稀土对共晶Al-2%Fe合金组织形态的影响 [J]. 中国稀土学报, 2004, 22 (5): 722-724.
- [16] 王新平, 廖志谦, 刘茵琪. Ti-Al-Fe合金的加工性能研究 [J]. 材料开发与应用, 1999, 14 (1): 12-15.
- [17] 李佐臣, 吴清枝, 王为民, 等. 一种新型生物工程材料Ti-5Al-2.5Fe合金 [J]. 稀有金属材料与工程, 1991 (3): 70-72.
- [18] 范秀风, 闫永旺, 刘国强, 等. 稀土对Al-Fe合金相组成及粉化的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36 (12): 1330-1332.
- [19] 董福宇. Sc、Zr、Ti复合合金化对过共晶铝铁合金组织和性能的影响 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2009.

## Influence of Ti Addition on As-Cast Structure and Hardness of Deoxidizer 45%Al-Fe-3%RE Alloy

FAN Xiu-feng<sup>1</sup>, YAN Yong-wang<sup>2</sup>, CHEN Yi-sheng<sup>2</sup>, SONG Wei<sup>2</sup>

(1. Analytical and Testing Center, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, China; 2. Material and Metallurgy School, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, China)

#### Abstract:

45%Al-Fe-3%RE alloy containing Ti was prepared using a vacuum medium frequency induction melting furnace. The as-cast structure and the hardness of 45%Al-Fe-3%RE alloy was analyzed by X-ray diffraction, SEM, spectroscopy and hardness tester. The results show that the grains in the as-cast structure of the alloy are significantly refined and the structure is more compact with increasing Ti content (0, 0.2%, 0.3%, 0.4%, 0.5%) in the 45%Al-Fe-3%RE alloy. When Ti content is 0.3%, the hardness of the alloy is the maximum, with a hardness value of HV 95.

#### Key words:

deoxidizer; 45%Al-Fe-3%RE alloy; as-cast structure; hardness