

Cr/Al 复合合金化 Fe_3Si 基有序合金及其有序度研究

Fe_3Si Based Ordered Alloyed by Cr/Al and Their Degree of Ordering

周琦¹, 贾建刚¹, 臧树俊¹, 赵红顺², 吴海涛¹

(1 兰州理工大学 甘肃省有色金属新材料省部共建国家重点实验室, 兰州 730050;

2 无锡西姆莱斯石油专用管制造有限公司, 江苏 无锡 214028)

ZHOU Qi¹, JIA Jian-gang¹, ZANG Shu-jun¹, ZHAO Hong-shun², WU Hai-tao¹

(1 State Key Laboratory of Gansu Advanced Non-ferrous Metal Materials,

Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2 Wuxi Seamless Oil Pipe Co., Ltd., Wuxi 214028, Jiangsu, China)

摘要: 基于合金化的改性原理, 以调整材料的长程有序度为改性思想, 采用真空电弧熔炼/热压退火制备了四种 Cr/Al 复合合金化 Fe_3Si 基有序合金。通过 XRD, SEM, EPMA 等对合金进行了表征, 并采用长程有序参数定量表征了退火得到的有序相的有序程度。结果表明: 四种不同成分的有序合金, 具有不同的显微组织。随着 Si 含量降低合金有序度下降, 且 Cr/Al 的复合效应对这一趋势起到了促进作用, 使得具有相同 Si 含量的 $\text{Fe}_{65}\text{Si}_{25}\text{Cr}_5\text{Al}_5$ 有序合金的有序度低于 Fe_3Si , 分别为 0.658 和 0.796。

关键词: Fe_3Si ; Al; Cr; 真空熔炼; 长程有序参数

中图分类号: TB35; TG13 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2012)01-0083-06

Abstract: Based on the modification principle and adjustment of materials order degree, four kinds of Fe_3Si based ordered alloys alloyed with Cr and Al were prepared by vacuum arc melting and annealing. Meanwhile, the alloys were characterized by XRD, SEM, EPMA, and the degree of ordering of the ordered phase was evaluated by the long range order (LRO) parameter. The result shows that four kinds of ordered intermetallics have different microstructure. With the decrease of Si content, the degree of order decreases. The effect of Al and Cr alloying plays a promoting roles in the decreasing tendency of degree of order. At the same content of Si, the order degree of $\text{Fe}_{65}\text{Si}_{25}\text{Cr}_5\text{Al}_5$ is lower than that of Fe_3Si . The order degrees of $\text{Fe}_{65}\text{Si}_{25}\text{Cr}_5\text{Al}_5$ and Fe_3Si are 0.658 and 0.796 respectively.

Key words: Fe_3Si ; Al; Cr; vacuum arc melting; long range order parameter

Fe_3Si 具有优异的磁学、电学性能^[1,2], 被广泛用于音频、视频及卡片阅读器用磁头材料。 Fe_3Si 也可应用于材料的表面改性而作为一种涂层材料^[3-5]。然而, Fe_3Si 自身所具有的优越耐腐蚀、抗氧化、耐摩擦以及制备原料低廉、制备方法简便等优点, 很可能使其成为一种潜在的结构材料, 但与之相关的研究工作并未引起人们的足够重视。一般在制备有序金属间化合物时通常进行有序化退火, 以提高其自身的有序度, Fe_3Si 过高的有序度虽然能提高其硬度及强度, 但本征脆性明显提高。为此, 多元化、复相化是金属间化合物发展的一大趋势。然而, 目前基于 Fe_3Si 基多元有序合金作为结构材料的研究工作甚少, 而这一工作将

有助于 Fe_3Si 的磁电学与结构性能的进一步提升, 从而加速其作为结构材料的应用。本工作采用元素 Al, Cr 的复合合金化及调整材料的长程有序(Long Range Order, LRO)参数为改性思想, 研究了 Fe-Si-Cr-Al 四组不同成分合金的组织形貌、结构及其有序度, 以期制备高度有序的 Fe_3Si 基有序合金提供实验依据。

1 实验材料和方法

1.1 Cr/Al 复合合金化 Fe_3Si 基有序合金成分设计

Keisuke Yamamoto 等的研究表明, 在 873K 时富 Fe 区的 Fe-Si-Cr 三元相图中出现了一两相 ($\text{A}_2 + \text{DO}_3$) 共存区^[6], 然而这一双相区在以往传统的 Fe-Si-

Cr 三元相图却未见到。这一报道为开发 Fe₃Si 基的复相 Fe-Si 金属间化合物带来了曙光。Keisuke Yamamoto 的研究是在成分为 Fe-(12%~15%, 原子分数,下同)Si-10%Cr 的合金中发现这一两相(A2+DO₃)共存区,为此 Fe-Si-Cr-Al 金属间化合物的成分设计在此基础上,应用半数 Al 来替代 Cr 进行复合合金化,原因如下:(1)元素 Cr 的引入将占据 DO₃ 超点阵中邻近 Si 的 Fe 原子位置^[7],这将降低 Si 在体系中的相对含量,不利于 DO₃ 超结构的形成;而元素 Al 则能够替代 Si 而提高其整体 Si 的含量。(2)元素 Al,Cr 都利于力学性能的改善。本工作依据文献[6]中通过调整元素 Si 含量来制备四组不同成分的 Fe-Si-Cr-Al 有序合金,以综合提高 Fe₃Si 的结构性能,具体的成分设计如表 1 所示。

表 1 合金的设计成分(原子分数/%)

Table 1 Planning components of the alloys(atom fraction/%)

| Specimen | Fe | Si | Cr | Al |
|---|----|----|----|----|
| Fe ₈₀ Si ₁₀ Cr ₅ Al ₅ | 80 | 10 | 5 | 5 |
| Fe ₇₅ Si ₁₅ Cr ₅ Al ₅ | 75 | 15 | 5 | 5 |
| Fe ₇₀ Si ₂₀ Cr ₅ Al ₅ | 70 | 20 | 5 | 5 |
| Fe ₆₅ Si ₂₅ Cr ₅ Al ₅ | 65 | 25 | 5 | 5 |

1.2 实验方法

采用 Fe 粉(90~200 目,纯度>98%),Si 粉(200 目,纯度>99%)和 Al 粉(200 目,纯度>99%),Cr 粉(200 目,≥99.5%)。将原子配比分别为 Fe₈₀Si₁₀Cr₅Al₅, Fe₇₅Si₁₅Cr₅Al₅, Fe₇₀Si₂₀Cr₅Al₅ 和 Fe₆₅Si₂₅Cr₅Al₅ 的混合粉末置于 Fritsch Pulversitte 5 型行星式球磨机中进行球磨混料,球料比为 10:1,球磨机转速为 100r/min,球磨时间为 5h,将混合好的粉料倒入圆柱形钢制模具中(模具型腔直径为 25mm),在万能拉伸试验机(AG-10TA)上压制(压力:60MPa,保压 5~10min)成直径为 φ25mm 的粉末粗坯。

采用 WS-4 非自耗真空电弧熔炼炉对压制的粉末粗坯进行熔炼。熔炼前将设备清洁干净,将冷压成型的粉末粗坯放入水冷铜坩锅中。然后用机械泵和扩散泵将炉腔内抽成 10⁻³Pa 真空,再充入高纯氩气(纯度 99.999%)到 1.0×10⁵Pa,重新抽真空至 10⁻³Pa。如此反复 4 次,最后充入 5×10⁴Pa 的氩气。将熔融的合金液体直接在水冷铜坩锅中冷却至室温。为了保证合金成分均匀,样品反复熔炼、冷却至少 3 次。将熔炼的试样在中频感应热压烧结炉中进行热压成型,同时消除试样在熔炼冷却过程中产生的内应力。此时所采用的热压工艺条件如下:温度 1100℃,压力 20MPa,烧结

时间为 40min。

采用 MeF3 型光学显微镜(OM),JSM-6700 型扫描电子显微镜(SEM)观察试样的显微形貌,用 D8ADVANCE 型 X 射线衍射仪(XRD)对试样进行物相分析,并用 EPMA1600 电子探针对试样进行成分分析。

2 结果与讨论

2.1 Cr/Al 复合合金化 Fe₃Si 基有序合金的显微组织

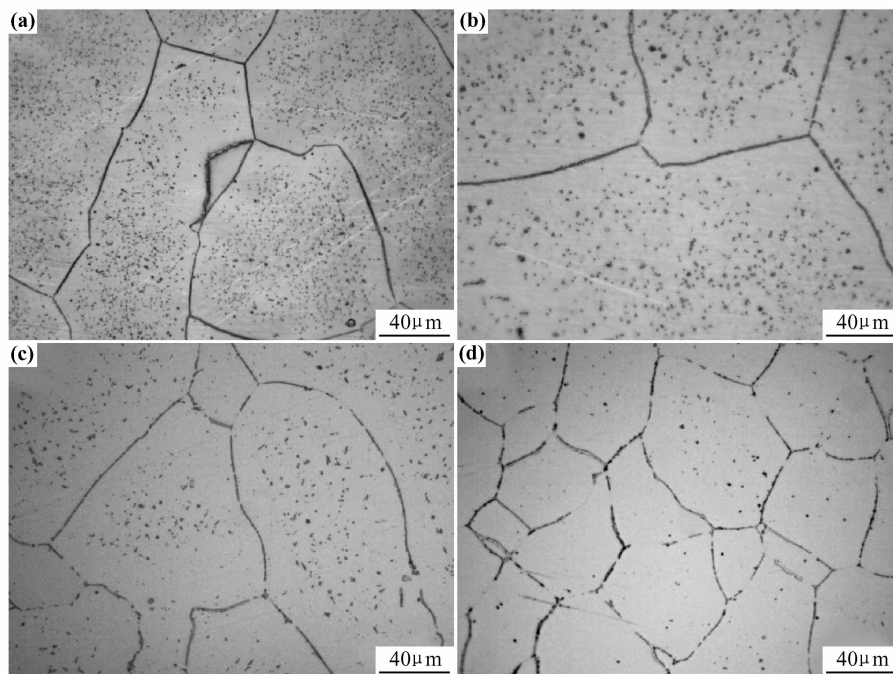
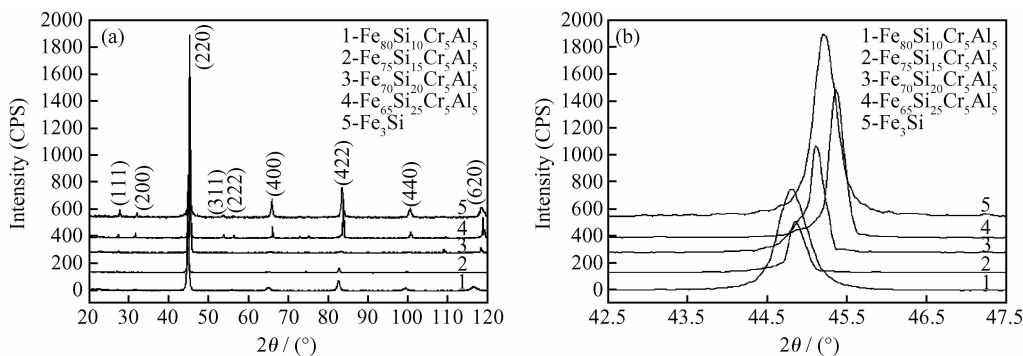
图 1 为四种不同成分合金的显微组织,观察面平行于冷却时温度梯度最大的方向。可以看到 Fe₇₅Si₁₅Cr₅Al₅ 的晶粒呈粗大的柱状晶,较大的柱状晶长度超过了 1000μm,Fe₆₅Si₂₅Cr₅Al₅ 的晶粒呈等轴状,晶粒尺寸约为 50μm,而 Si 含量介于二者中间的 Fe₇₀Si₂₀Cr₅Al₅,其显微组织也介于二者之间,等轴晶的直径比 Fe₆₅Si₂₅Cr₅Al₅ 大,而柱状晶的长度比 Fe₇₅Si₁₅Cr₅Al₅ 小。

对比可见,随着 Si 含量的增加,铸态的粗大晶粒逐渐向细小的等轴晶转化,这也说明了 Si 含量的增加利于细化晶粒,而文献[8]中也提及元素 Si 利于 Fe-Si 合金晶粒的细化。并且,在晶粒内部依然存在一些第二相,这些第二相的量随着 Si 含量的增加而降低,而对于这些第二相的深入分析将在微区元素分析中给出。

2.2 Cr/Al 复合合金化 Fe₃Si 基有序合金的物相组成及有序度

图 2 为四种不同成分合金物相组成的 XRD 谱图。为比较元素 Si 含量对晶格常数的影响,特将 Fe₃Si 的 XRD 谱峰列于图 2 中。

从图 2 可以看到,经过真空熔炼/热压退火后的试样,其晶体结构均为有序的 DO₃ 型 Fe₃Si 基金属间化合物有序合金。元素 Al 在 DO₃ 型 Fe₃Si 中的引入,从晶体学角度占据 DO₃ 超结构的 Si 位置,从而依然保持超有序结构,但研究表明这将降低 Fe₃Si 的有序转变温度。从有序转变动力学角度来看,元素 Al 将延缓凝固过程中 A2→B2→DO₃ 的有序转变,因此元素 Al 能起到降低 DO₃ 型 Fe₃Si 长程有序度的作用。另外,元素 Cr 会占据 DO₃ 超结构中 Fe 原子位置,将降低元素 Si 的相对含量,这对材料有序化转变是不利的。所以,元素 Al 和 Cr 的复合加入降低了 Fe₈₀Si₁₀Cr₅Al₅ 在热压退火条件下发生有序化转变,从而使得其超衍射峰强度很低而难以区分。从图 2(b)中可见,四种 Fe-Si-Cr-Al 金属间化合物的衍射峰随着 Si 含量的增加而逐渐偏向衍射的高角度值。而 Fe₃Si 的

图 1 Cr/Al 复合合金化 Fe₃Si 基有序合金的显微组织(a) Fe₈₀Si₁₀Cr₅Al₅; (b) Fe₇₅Si₁₅Cr₅Al₅; (c) Fe₇₀Si₂₀Cr₅Al₅; (d) Fe₆₅Si₂₅Cr₅Al₅Fig. 1 Microstructure of Fe₃Si based ordered intermetallics alloyed by Cr and Al(a) Fe₈₀Si₁₀Cr₅Al₅; (b) Fe₇₅Si₁₅Cr₅Al₅; (c) Fe₇₀Si₂₀Cr₅Al₅; (d) Fe₆₅Si₂₅Cr₅Al₅图 2 Cr/Al 复合合金化 Fe₃Si 基有序合金物相组成的 XRD 谱图

(a)XRD 谱图; (b)(220) 晶面最强峰

Fig. 2 XRD patterns for Fe₃Si based ordered intermetallics alloyed by Cr and Al

(a)XRD patterns; (b)the strongest diffraction peak of (220)

峰位置则介于 Fe₇₀Si₂₀Cr₅Al₅ 与 Fe₆₅Si₂₅Cr₅Al₅ 之间。从图 3 中各成分 Fe-Si-Cr-Al 有序合金晶格常数随着 Si 含量的增加而逐渐降低,对于与 Fe₃Si 同属于 Im-3m 空间群的 Fe,其晶格常数为 0.2867nm。因此随着元素 Si 的增加,处于体心位置的 Fe 原子被部分替代形成 DO₃ 超结构而晶格常数降低。完全有序化的 DO₃ 型 Fe₃Si 的晶格常数为 0.5654nm(PDF451207),这一值低于图 3 中除 Fe₆₅Si₂₅Cr₅Al₅ 外的所有合金的晶格常数。这一结果说明了虽然 Fe-Si 相图中 Si 含量在 8%~27% 之间都为 Fe₃Si 相,但其晶格常数随成分

不同而存在微小差异。对于 Fe₆₅Si₂₅Cr₅Al₅ 的晶格常数较低,且低于 0.5654nm,是因为占据超晶格亚点阵 Si 位置的 Si+Al>25%,必将部分替代 Fe 原子而使完全有序化的 DO₃ 型 Fe₃Si 晶格常数降低。

在实验所制备的 Fe-Si-Cr-Al 有序合金中,元素 Si,Al,Cr 复合化效应都将影响 Fe₃Si 的有序度变化。有序度是定量描述金属间化合物有序程度的量度,用长程有序参数(LRO)来表征,其计算公式如下^[9]:

$$LRO = \left[\frac{I^s/I_0^s}{I^f/I_0^f} \right]^{1/2} \quad (1)$$

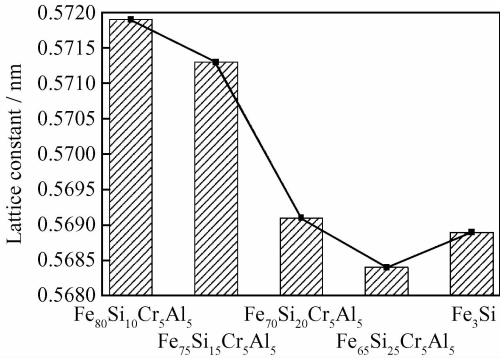


图 3 Cr/Al 复合合金化 Fe₃Si 基有序合金的晶格常数变化
Fig. 3 Variation of lattice parameters for Fe₃Si based ordered intermetallics alloyed by Cr and Al

式中： I^s 和 I^f 分别为超结构衍射峰和最强峰的强度，在计算过程中 I^s 和 I^f 分别采用(111)面和(220)面的衍射峰； I_0^s 和 I_0^f 分别为理想的有序化 DO₃ 超结构衍

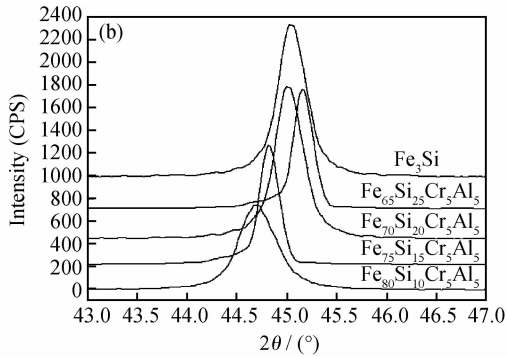
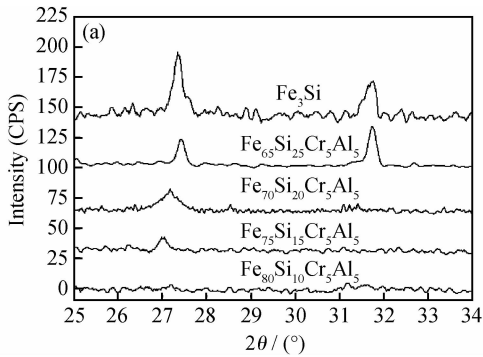


图 4 Cr/Al 复合合金化 Fe₃Si 基有序合金(111)和(200) 晶面衍射峰
(a)(111)和(200)晶面超衍射峰；(b)(220)晶面最强峰

Fig. 4 The diffraction peak of (111) and (200) for Fe₃Si based ordered intermetallics alloyed by Cr and Al
(a)the diffraction peak of (111) and (200)；(b)the strongest diffraction peak of (220)

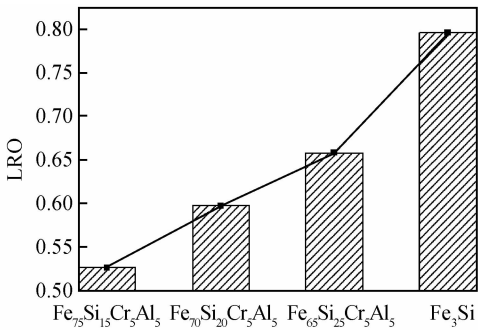


图 5 Cr/Al 复合合金化 Fe₃Si 基有序合金的有序度变化关系
Fig. 5 The relationship between the degree of order for Fe₃Si based ordered intermetallics alloyed by Cr and Al

由图 5 可见，对于三种 Fe-Si-Cr-Al 有序合金随着 Si 含量的升高，其有序度逐渐增加，且近似于直线关系，

射结果所对应的(111)超结构衍射峰和(220)最强衍射峰的强度，其数据采用卡片号为 45-1207 的 PDF 卡。

为保证计算结果的准确性，采用 XRD 分段慢扫描对选取的两个峰进行了测定。扫描参数如下：电压 46kV，电流 100mA，步长 0.005°，0.25(°)/min，扫描角度 25~34°和 43~47°，结果如图 4 所示。

由图 4 可见，随 Si 含量的增加，XRD 谱图中(111)，(200)晶面的超结构衍射峰的强度加强。Fe₈₀Si₁₀Cr₅Al₅的低角度超衍射依然没有出现，并且 Fe₇₅Si₁₅Cr₅Al₅和 Fe₇₀Si₂₀Cr₅Al₅的(200)晶面超衍射峰也没有出现，表象上讲元素 Al 和 Cr 的加入降低了 Fe₃Si 在制备条件下的有序转变。由于没有检测到 Fe₈₀Si₁₀Cr₅Al₅的超衍射峰，因此难于应用公式(1)进行有序度计算，其他四种包括 Fe₃Si 在内的 DO₃ 型有序合金的有序度计算结果列于图 5 中。

表明元素 Si 对于材料有序度的提高至关重要。对比 Si 含量同为 25%的 Fe₆₅Si₂₅Cr₅Al₅和 Fe₃Si 可以发现，元素 Al 和 Cr 的加入明显降低了 Fe₃Si 的有序度。同时对于 Fe₇₀Si₂₀Cr₅Al₅来说，其有序度值要明显低于成分为 Fe₇₅Si₂₀Al₅的 Fe₃(Si_{0.80}, Al_{0.20})有序合金，在同样条件下 Fe₃(Si_{0.80}, Al_{0.20})的有序度计算为 0.742，这说明元素 Cr 也起到了降低材料长程有序度的作用。

2.3 Cr/Al 复合合金化 Fe₃Si 基有序合金的微区元素分析

由图 2 的衍射结果可知，四种合金的物相组成均为 DO₃ 型的 Fe₃Si 基有序合金，而没有其他相存在，但在四种合金的显微组织中都发现了类似第二相的细小颗粒。为了查明原因，利用电子探针对 Fe₇₅Si₁₅Cr₅Al₅和 Fe₆₅Si₂₅Cr₅Al₅进行了分析，元素面分布结果分别示于图 6 和图 7 中。可以看到，Fe₇₅Si₁₅Cr₅Al₅

中的 Cr 元素在晶界发生了明显富集，而 Fe₆₅Si₂₅Cr₅Al₅ 中也有较多的 Cr 偏聚于晶界，同时，Cr 在整个表面分布比 Fe₇₅Si₁₅Cr₅Al₅ 更为均匀。仔细观察图 6 (b),(d)不难发现，在靠近晶界附近的黑色颗粒较少，

由此可以推断，四种合金晶粒内疑似为第二相的颗粒为富 Cr 的区域，合金在冷却过程中，晶界附近的 Cr 偏聚于晶界，离晶界较远的富 Cr 区由于来不及扩散至晶界而被保留在晶粒内部。

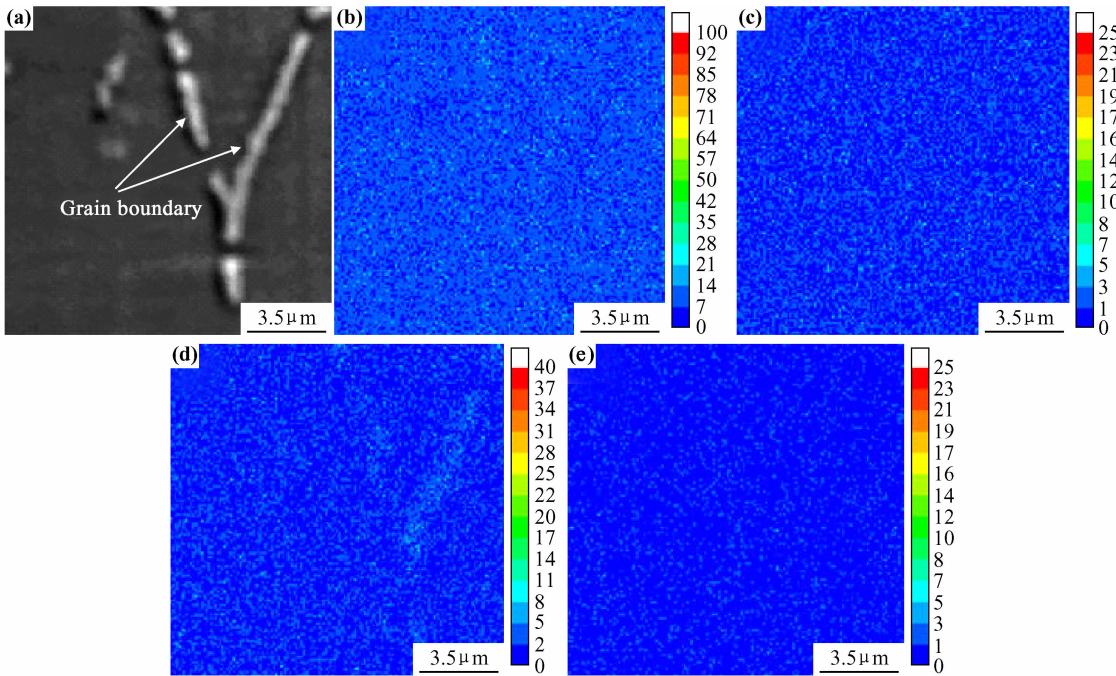


图 6 Fe₇₅Si₁₅Cr₅Al₅ 的 SEM 形貌及其元素面分布

(a)SEM 形貌;(b)Fe;(c)Si;(d)Cr;(e)Al

Fig. 6 SEM micrographs of Fe₇₅Si₁₅Cr₅Al₅ and corresponding elemental mapping

(a)SEM morphology;(b)Fe;(c)Si;(d)Cr;(e)Al

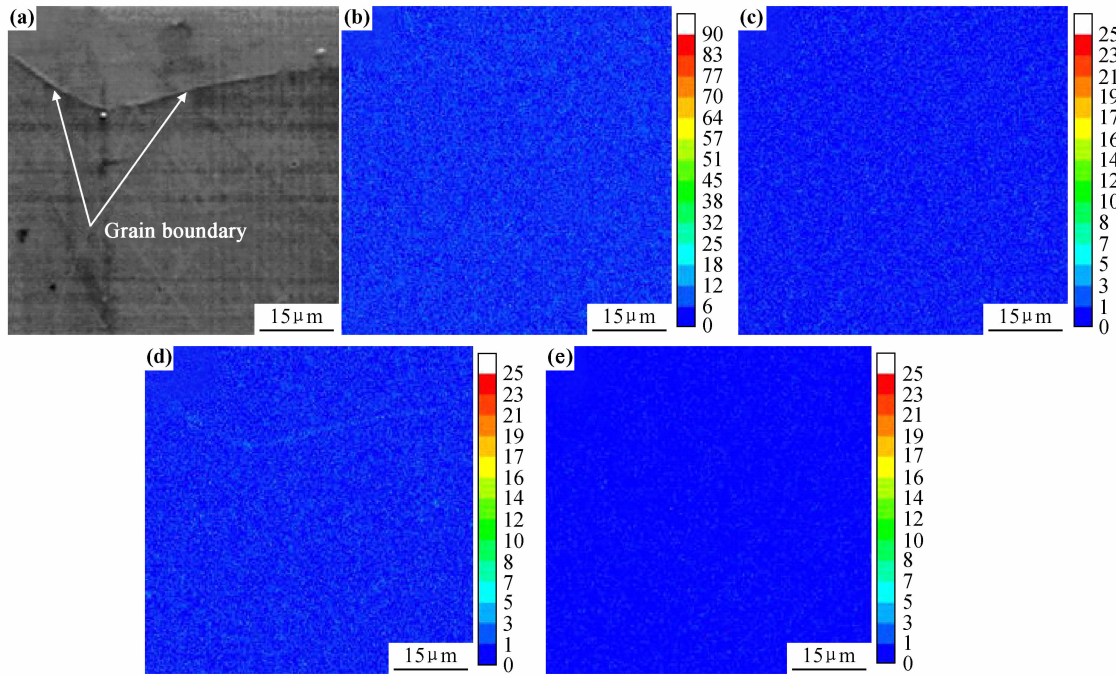


图 7 Fe₆₅Si₂₅Cr₅Al₅ 的 SEM 形貌及其元素面分布

(a)SEM 形貌;(b)Fe;(c)Si;(d)Cr;(e)Al

Fig. 7 SEM micrographs of Fe₆₅Si₂₅Cr₅Al₅ and corresponding elemental mapping

(a)SEM morphology;(b)Fe;(c)Si;(d)Cr;(e)Al

3 结论

(1) 设计成分为 $\text{Fe}_{80}\text{Si}_{10}\text{Cr}_5\text{Al}_5$, $\text{Fe}_{75}\text{Si}_{15}\text{Cr}_5\text{Al}_5$, $\text{Fe}_{70}\text{Si}_{20}\text{Cr}_5\text{Al}_5$ 和 $\text{Fe}_{65}\text{Si}_{25}\text{Cr}_5\text{Al}_5$ 的四种 Fe_3Si 基有序合金在相同的熔炼条件下具有不同的显微组织, 其中 $\text{Fe}_{80}\text{Si}_{10}\text{Cr}_5\text{Al}_5$, $\text{Fe}_{75}\text{Si}_{15}\text{Cr}_5\text{Al}_5$ 为粗大的柱状晶, $\text{Fe}_{65}\text{Si}_{25}\text{Cr}_5\text{Al}_5$ 为相对比较细小的等轴晶, 而 $\text{Fe}_{70}\text{Si}_{20}\text{Cr}_5\text{Al}_5$ 的显微组织介于两者之间, 晶粒大小、形状差别明显。它们的共同特征是 Cr 元素在合金中的分布不均, 倾向于在晶界和晶粒内部的某些区域富集。

(2) 电弧熔炼/热压退火制备的 Cr/Al 复合合金化 Fe_3Si 基有序合金的主相为 Fe_3Si 。Si 含量的变化是影响其有序度的关键, 随 Si 含量降低, 合金有序度下降, 且元素 Cr 也起到了降低材料长程有序度的作用, 同时 Al, Cr 的复合效应对这一趋势起到了促进作用, 使得相同 Si 含量的 $\text{Fe}_{65}\text{Si}_{25}\text{Cr}_5\text{Al}_5$ 的有序度仍低于 Fe_3Si , 分别为 0.658 和 0.796。

参考文献

- [1] ZUO B, SARASWATI N, SRITHARAN T, et al. Production and annealing of nanocrystalline Fe-Si and Fe-Si-Al alloy powders [J]. *Materials Science and Engineering*, 2004, 371A (1-2): 210-216.
- [2] KALITA M P C, PERUMAL A, SRINIVASAN A. Structural analysis of mechanically alloyed nanocrystalline $\text{Fe}_{75}\text{Si}_{15}\text{Al}_{10}$ powders [J]. *Materials Letters*, 2007, 61(3): 824-826.
- [3] SCHNEEWISS O, PIZUROVA N, JIRAKOVA Y, et al. Fe_3Si

surface coating on SiFe steel[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2000, 215(216): 115-117.

- [4] CHERIGUI M, FERAOUN H I, FENINEHE N E, et al. Structure of amorphous iron-based coatings processed by HVOF and APS thermally spraying[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2004, 85(1): 113-119.
- [5] CHERIGUI M, FERAOUN H I, FENINEHE N E, et al. Microstructure and magnetic properties of Fe-Si-based coatings produced by HVOF thermal spraying process[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2007, 427(1-2): 281-290.
- [6] YAMAMOTO K, KIMURA Y. Phase constitution and microstructure of the Fe-Si-Cr ternary ferritic alloys [J]. *Scripta Materialia*, 2004, 50(7): 977-981.
- [7] PUGACZOWA-MICHALSKA M, DOBRZYNSKI L, LIPINSKI S. Electronic structure and magnetism of $\text{Fe}_{3-x}\text{Cr}_x\text{Si}$ alloys [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2003, 256 (1-3): 46-53.
- [8] ZUO B, SRITHARAN T. Ordering and grain growth in nanocrystalline $\text{Fe}_{75}\text{Si}_{25}$ alloy[J]. *Acta Materialia*, 2005, 53(4): 1233-1239.
- [9] BAKKER H, ZHOU G F, YANG H. Mechanically driven disorder and phase transformations in alloys [J]. *Progress in Materials Science*, 1995, 39(3): 159-241.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51001057); 甘肃省自然科学基金资助项目(1014RJZA006)

收稿日期:2010-08-10; **修订日期:**2011-07-25

作者简介:周琦(1963—), 女, 硕士, 教授, 主要从事新材料的开发与应用研究, 联系地址: 甘肃兰州市兰工坪路 287 号, 兰州理工大学材料学院(730050), E-mail: zhouxq301@sina.com.cn

(上接第 82 页)

- [9] ZHANG X, TAO X, YICK K, et al. Structure and thermal stability of microencapsulated phase-change materials[J]. *Colloid Polym Sci*, 2004, 282(4): 330-336.
- [10] HU J F, CHEN H Q, ZHANG Z B. Mechanical properties of melamine formaldehyde microcapsules for self-healing materials [J]. *Mater Chem Phys*, 2009, 118(1): 63-70.
- [11] LI H Y, WANG R G, HU H L, et al. Surface modification of self-healing poly(urea-formaldehyde) microcapsules using silane-coupling agent[J]. *Appl Surf Sci*, 2008, 255(5): 1894-1900.
- [12] KUBOTA J, HIRABAYASHI N, KATO A, et al. Microreactor utilized preparation of monodispersed polymeric microcapsules by urea/formaldehyde phase separation method [J]. *Colloids Surf A*, 2007, 302(1-3): 320-325.
- [13] QIAO R, ZHANG X L, QIU R, et al. Synthesis of functional microcapsules by in situ polymerization for electrophoretic image display elements[J]. *Colloids Surf A*, 2008, 313-314(2): 347-350.

- [14] LI Y, GUO A, LIANG G. Preparation and properties of poly(urea-formaldehyde) microcapsules filled with epoxy resins[J]. *Mater Chem Phys*, 2008, 110(2-3): 417-425.

- [15] ZHANG L C, LI Z B. *Condensation Polymerization*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1986. 370-371.

- [16] SY/T6578-2003, 输油管道减阻剂减阻效果测试方法[S].

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2008CB617508)

收稿日期:2010-06-28; **修订日期:**2011-07-18

作者简介:李冰(1979—), 男, 博士, 主要从事稳储环保新材料包覆分散技术及其开发应用方面研究, 联系地址: 山东省济南市经十路 73 号, 山东大学千佛山校区化学与化工学院 1 号教学楼 328 室(250061), E-mail: mindless000cn@163.com

通讯作者:张长桥(1957—), 男, 教授, 博导, 主要从事化学反应工程的教学与科研工作, 联系地址: 山东省济南市经十路 73 号, 山东大学千佛山校区化学与化工学院 1 号教学楼 328 室(250061), E-mail: zhangchqiao@sdu.edu.cn