



Si 对 FeMoCrNi 高温耐磨合金的 组织和抗氧化性能的影响

李洁翡^{1,2}, 尹付成^{1,2}, 刘永雄^{1,2}, 欧阳雪枚^{1,2}, 李 智^{1,2}, 赵满秀^{1,2}

(1. 湘潭大学 材料科学与工程学院, 湘潭 411105;

2. 湘潭大学 材料设计及制备技术湖南省重点实验室, 湘潭 411105)

摘 要: 利用扫描电镜、X 射线衍射仪等研究 Si 对 FeMo25Cr14Ni10 高温耐磨合金组织及其 800 °C 氧化行为的影响。结果表明: 合金的铸态和退火态组织均为 α -Fe (Mo,Cr,Ni) + Laves 相(Fe₂Mo 型)。随 Si 含量增加, 合金中铸态组织形态由魏氏体组织转变为枝晶组织。Si 的加入明显改善了合金的抗氧化性能, 其作用机理在于提高了基体中 Cr 的含量, 促进了致密 Cr₂O₃ 氧化膜的形成; 而 Mo 和 Si 在 Laves 相中的富集增强了中间相的稳定性, 抑制了 Mo 的氧化与挥发。但当 Si 含量较低时, 低熔点 Mo 氧化物的挥发不能得到完全抑制, 外氧化膜较为疏松, 并且会产生剥落现象。Si 含量为 3%~4%(质量分数)的 FeMo25Cr14Ni10 合金具有优异的抗氧化性能。

关键词: Si; FeMoCrNi 合金; 耐磨合金; 静态氧化; Laves 相

中图分类号: TG132.3+2

文献标志码: A

Effect of Si on microstructures and oxidation resistance of FeMoCrNi high temperature wear-resistance alloys

LI Jie-fei^{1,2}, YIN Fu-cheng^{1,2}, LIU Yong-xiong^{1,2}, OUYANG Xue-mei^{1,2}, LI Zhi^{1,2}, ZHAO Man-xiu^{1,2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China;

2. Key Laboratory of Materials Design and Preparation Technology of Hunan Province,
Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

Abstract: The effects of Si on the microstructures of FeMo25Cr14Ni10 high temperature wear-resistance alloys and its oxidation behaviors at 800 °C were investigated by scanning electron microscopy (SEM) and X ray diffractometry. The results show that the microstructures of as-cast alloys and annealed alloys are α -Fe (Mo,Cr,Ni) + Laves phase (Fe₂Mo type). With the increase of Si content, the as-cast microstructure of alloy changes from Widmanstatten into dendrite. The addition of Si obviously improves the oxidation resistance of the alloys. The action mechanism of Si is that Si can increase the content of Cr in the matrix and promote the formation of dense Cr₂O₃ film, while the accumulation of Mo and Si in Laves phase increases the stability of the intermediate phase and inhibit oxidation and volatilization of Mo oxides. While when Si content is lower, the volatilization of Mo oxide with low melting point can not be inhibited completely, the outer film is loose, resulting in the spalling of the oxidation film. FeMo25Cr14Ni10 with 3%~4% Si (mass fraction) have excellent oxidation resistance.

Key words: Si; FeMoCrNi alloy; wear-resistance alloy; static oxidation; Laves phase

研究微量元素在高温合金中的作用机理、找到提高高温合金使用性能的新方法是高温合金研究的一个

重要方向^[1]。钴基高温耐磨合金由于其具有优异的综合性能而得到广泛应用。其中典型的产品是美国

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51471141)

收稿日期: 2015-03-31; 修订日期: 2015-07-03

通信作者: 尹付成, 教授, 博士; 电话: 0731-58292213; E-mail: fuchengyin@xtu.edu.cn

Stellite 公司开发的 T-800。T-800 是一种基于 Co 基体保证韧性、CoMoCrSi 中间相保证耐磨性的 Co-Mo-Cr-Si 合金^[2]。但我国 Co 资源匮乏, 开发出一种以 Fe 代 Co 的新型铁基高温耐磨合金具有重要的意义。基于这种背景, 本文作者所在课题组前期通过 CALPHAD 方法设计出一种以奥氏体保证韧性、Fe₂Mo 型 Laves 相保证耐磨性的新型合金的成分^[3], 并实验研究了热处理工艺对该类合金的组织 and 性能的影响^[4]。结果表明, 基于 Laves 相强化的 Fe-Mo-Cr-Ni 合金具有良好的红硬性、耐磨性与耐蚀性。该合金的合金化原理为用 Mo 与 Fe 生成硬质 Fe₂Mo 型 Laves 相以保证合金的耐磨性; 其中所含的 Ni 可以扩大奥氏体相区, 保证基体为韧性奥氏体组织; 所含 Cr 可以保证合金的耐蚀性和高温抗氧化性。结果表明, FeMo25Cr14Ni10 在 Fe-Mo-Cr-Ni 合金系中具有较好的热稳定性、红硬性及耐磨性^[5]。Si 是钢铁及有色合金中一种重要的合金元素, 也是主要的提高耐蚀性能的元素之一^[6]。为进一步提高合金的综合性能, 本文作者在已有研究的基础上, 利用 SEM-EDS、XRD 等研究 Si 对 Fe-Mo-Cr-Ni 合金组织和抗氧化性能的影响, 以期提高合金的抗氧化性, 为研制开发新型高温合金提供理论基础。

1 实验

为研究 Si 对 Fe-Mo-Cr-Ni 合金抗氧化性的改性作用, 本实验中共设计了 8 种不同 Si 含量的 Fe-Mo-Cr-Ni 合金成分。实验原料为纯度均为 99.99 % 的 Fe 粒、Mo 片、Cr 粒、Ni 粒和 Si 粒。由于 Si 含量较高时对合金的力学性能可能产生不利影响^[7], 故设计的 8 种成分采取阶梯式上升并控制 Si 含量在 4%(质量分数)以内。按合金成分配比(见表 1)称样, 采用非自耗磁控真空电弧炉熔炼, 每个样品反复熔炼 7~8 遍, 合金锭质量为 10 g。将合金锭封装于抽真空的石英管中, 然后放入 1150 °C 管式炉内退火 9 h, 空冷后利用线切割将其切割为 2 mm×8 mm×10 mm 的试样。用水磨砂纸将试样每个面打磨至光洁镜面, 在静态氧化实验前用无水乙醇洗净干燥备用。静态氧化实验依据高温合金氧化测定实验方法进行^[8], 将样品分别放入已焙烧至恒量的刚玉坩埚内, 放入管式炉(控温精度±1 °C)均温区, 温度为 800 °C, 按实验预定的出炉周期称量, 在静态空气中冷却至室温, 用电子天平(精度 0.1 mg)称量试样。利用 JSM-6360LV 型 SEM 观察合金形貌; 利用 OXFORD INCA EDS 测定合金成分; 利用 Rigaku Ultimate IV 型 X 射线衍射仪对物相进行鉴定。

表 1 Fe-Mo-Cr-Ni 合金的名义成分
Table 1 Nominal chemical compositions of Fe-Mo-Cr-Ni alloys

Alloy No.	Mass fraction/%				
	Mo	Cr	Ni	Si	Fe
1	25	14	10	0.00	Bal.
2	25	14	10	0.50	Bal.
3	25	14	10	1.00	Bal.
4	25	14	10	1.25	Bal.
5	25	14	10	1.50	Bal.
6	25	14	10	2.00	Bal.
7	25	14	10	3.00	Bal.
8	25	14	10	4.00	Bal.

2 实验结果

2.1 硅含量对合金的组织 and 组成相成分的影响

图 1 所示为不同硅含量合金在铸态 and 退火态下的典型组织。铸态组织形貌皆由针状组织交织混合而成(见图 1(a) and (b)), 其结果与 CARTER 等^[9]获得的 Fe-30Mo 合金的铸态组织形貌类似, 为魏氏体组织。合金在凝固过程中先形成了铁基固溶体基体相 α -Fe (Mo,Cr,Ni), 然后再析出 Laves 相, 这一过程与 BECHTOLDT 等^[10]的研究结果类似。而当 Si 含量从 1.25% 增加到 2%(质量分数)时, 魏氏体组织消失, 出现富 Mo 的枝晶组织, 与 α -Fe (Mo,Cr,Ni) 基体相间出现明显的晶界, 富 Mo 的 Laves 相比例显著增加。而含 3.00%Si 的合金 7 中出现规则的细小层状组织, 可能是共晶形式协同生长而成的 FCC+Laves 相, 这种组织在 Fe-Mo-Si 合金也出现过^[11]。含 4.00%Si 的合金 8 中出现了发达的富 Mo 枝晶组织。经过 1150 °C 下均匀化退火 9 h 的合金中, 组织变得较为均匀, 主要为 Laves 相与基体相 α -Fe (Mo, Cr, Ni)。

表 2 所列为不同 Si 含量合金退火组织中组成相的成分。根据 EDS 结果, 发现在 8 种合金中, 主要存在两种成分差异较明显的区域, 分别为 α -Fe (Mo,Cr,Ni) 和 Laves 相。表 2 所列为退火态合金组成相的平均成分。结果表明, 大部分 Si 元素分布于 Laves 相中。随合金中 Si 含量的增加, Laves 相中的 Mo 含量随之增加; 基体中的 Cr 含量有少量增加, 但 Mo 含量有所减少。这对提高基体的抗氧化性和减少 Mo 的氧化物的挥发有所帮助。EDS 结果表明, 各样品中铸态 and 其退火态的主要成分基本一致。

图 2 所示为合金 1 和 8 退火组织的 XRD 谱。实

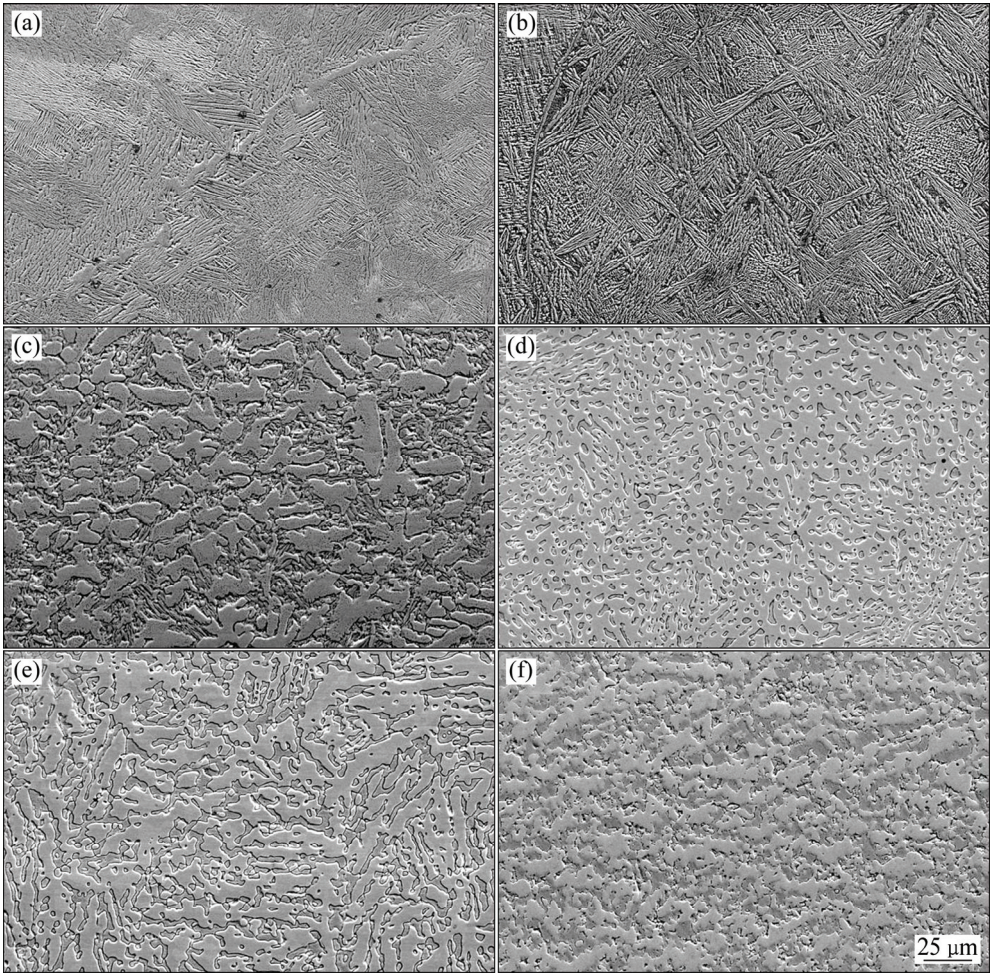


图 1 Si 含量不同的 FeMo25Cr14Ni10 合金的铸态及退火态组织

Fig. 1 As-cast and annealed microstructures of FeMo25Cr14Ni10 with different Si contents: (a) As-cast, alloy 1; (b) As-cast, alloy 3; (c) As-cast, alloy 8; (d) Annealed, alloy 1; (e) Annealed, alloy 3; (f) Annealed, alloy 8

表 2 退火态合金组成相的平均成分

Table 2 Average composition of phases in annealed alloy

Phase	Alloy No.	Mole fraction/%					Phase	Alloy No.	Mole fraction/%				
		Fe	Mo	Cr	Ni	Si			Fe	Mo	Cr	Ni	Si
α -Fe	1	63.1	8.2	14.1	14.6	0.0	Laves	1	53.3	20.5	17.7	8.5	0.0
	2	62.2	8.7	14.8	13.6	0.7		2	52.3	20.5	17.2	8.4	1.6
	3	63.1	6.6	15.0	14.0	1.3		3	51.3	21.3	17.7	7.2	2.5
	4	62.5	6.7	15.1	14.0	1.7		4	49.9	22.5	16.4	7.5	3.7
	5	62.5	6.3	15.5	13.7	2.0		5	48.1	23.8	16.3	7.5	4.3
	6	62.3	6.3	15.6	13.2	2.6		6	46.7	24.5	16.7	6.9	5.2
	7	61.4	5.9	16.1	12.6	4.0		7	43.5	26.3	15.0	6.8	8.4
	8	61.0	5.0	16.4	12.7	4.9		8	41.0	28.4	12.6	7.0	11.0

验证其组织均为 FCC+Laves 相。从图 2 可发现，含 4%Si 的合金 8 与不含 Si 的合金 1 相比，Laves 相的衍射峰向左发生了偏移，说明其成分发生了改变。随着

合金中 Si 含量的增加，Mo 与 Si 含量呈正相关性增长。由于合金中固溶了更多的原子半径较大的 Mo，以及 Si 占据 Laves 相的间隙位置，导致点阵常数增加，使

衍射峰左移。这与邹欣伟等^[12]的研究相一致, 许多二元 Laves 相可以固溶相当大的第三元素而不改变其本身的晶体结构, 且 Fe_2Mo 型的 Laves 相可以固溶第三元素。其他合金的 XRD 结果显示出相同规律。

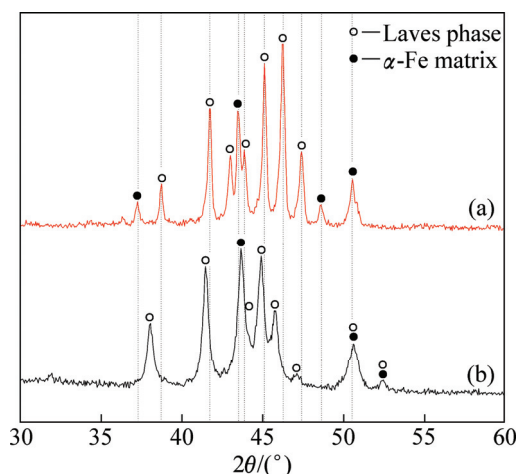


图 2 退火态合金的 XRD 谱

Fig. 2 XRD patterns of alloys after annealing: (a) Alloy 1; (b) Alloy 8

2.2 硅对合金静态氧化性能的影响

图 3 所示为退火样品 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 静态氧化的动力学曲线。实验最长时间为 184 h 。从合金的氧化动力学曲线可发现, 几乎所有的样品在初期阶段($0\sim 4\text{ h}$)都出现了质量增加与质量损失的反反复过程。从合金表面氧化物的 EDS 结果来看, 最外层氧化膜中只存在微量的 Mo。这是由于合金在未形成致密氧化膜的初期阶段, Mo 和 O_2 形成了 MoO_3 。而 MoO_3 的熔点为 $795\text{ }^{\circ}\text{C}$, 在 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下极易挥发^[13], 故在初期未形成致密氧化膜的情况

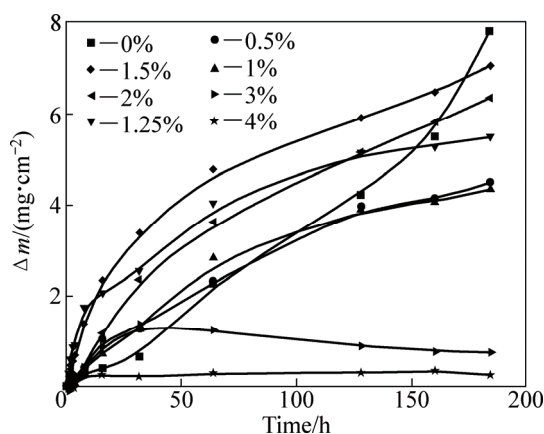


图 3 合金的氧化动力学曲线

Fig. 3 Oxidation kinetic curves of alloys with different Si

contents

下, 同时存在氧化物的形成导致的质量增加与由于 MoO_3 挥发造成的质量损失两个过程^[14]。不含 Si 的合金 1 在 $32\sim 160\text{ h}$ 的氧化过程中, 质量增加曲线接近直线增长, 氧化后期表面氧化皮逐渐脱落, 质量迅速增加, 出现了灾难性氧化。

图 4 所示为合金氧化增量随 Si 含量的变化曲线。由图 4 可知, 氧化增量与合金中的硅含量之间的关系比较复杂。但合金中加入 Si 后避免了灾难性氧化。其中, 合金 2、3、4、5 和 6 的氧化动力学曲线类似, 都呈抛物线型。随着 Si 含量的加入, 氧化增量随硅含量增加而减少, 当 Si 含量高于 1.5% 后, 氧化增量迅速降低, 特别是 Si 含量达到 $3\%\sim 4\%$ 时, 合金经过前期的质量增加和质量损失后一直处于非常稳定的状态, 几乎维持原状, 表现出了优异的抗氧化性。

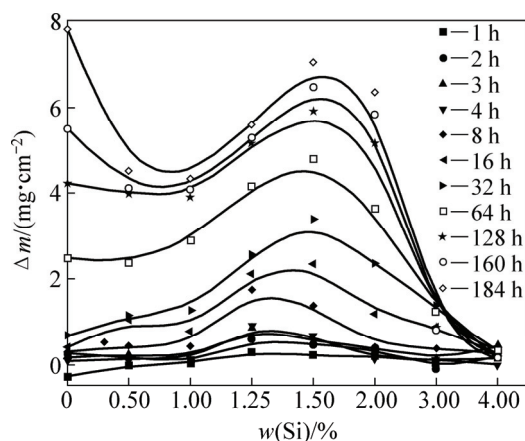


图 4 合金氧化不同时间氧化增量随 Si 含量的变化曲线

Fig. 4 Changing curves of mass increments with Si content during oxidation of alloys for different time

2.3 氧化产物的形貌与形成过程

为研究 Si 对合金氧化性能的影响规律, 对氧化物的种类、形貌及其形成过程进行了研究。图 5 所示为典型合金氧化物的表面形貌。从图 5 看出, 氧化物表面形貌的差异很大, 硅含量较低的合金 1 与 3 的表层氧化物呈丘陵形态, 合金 3 的“起伏”程度比合金 1 的更大。合金 1 的底层氧化物出现明显剥落后的痕迹, 边缘为层片状, 合金 3 的底层氧化物较合金 1 的更平整。Si 含量不超过 2% 的合金中都出现了氧化膜不同程度剥落的现象。而 Si 含量较高的合金 7 与 8 的氧化层致密完整, 且氧化膜表面都生成了一些规则的小鼓包。合金 8 中鼓包尺寸的比合金 7 中的小, 且分布更加均匀与密集。

图 6 所示为合金氧化后的截面组织和成分分布。

由图 6 可知, 合金中 Si 含量较低时, 如合金 1 和 3,

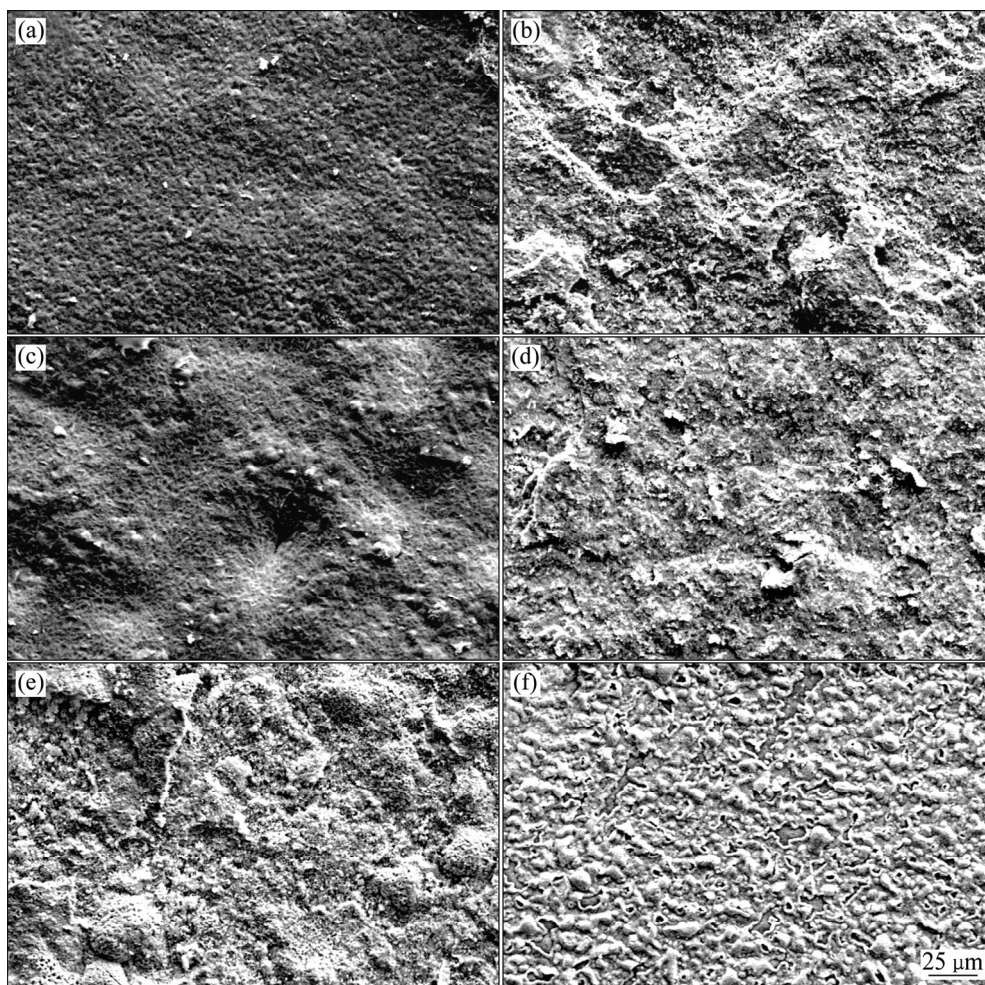


图 5 800 °C 静态氧化 184 h 后合金的氧化表面形貌

Fig. 5 Oxidation surface morphologies of alloys after static oxidation at 800 °C for 184 h: (a) Surface oxide film of Alloy 1; (b) Underlying oxide film of Alloy 1; (c) Surface oxide film of Alloy 3; (d) Underlying oxide film of Alloy 3; (e) Surface oxide film of Alloy 7; (f) Surface oxide film of Alloy 8

表面氧化膜明显分为较为疏松的外层和较为致密的底层, 而 Si 含量较高的合金 8 表面只有一层较薄的氧化层。从成分分布结果来看, Cr 主要是富集在与基体结合紧密的内氧化层, 说明在内氧化层中含 Cr 的氧化物为其主要成分之一。比较 Mo 在氧化层的分布发现, 合金 1 中 Mo 富集在底层的外侧, 且从底层到外层, Mo 含量逐步减小; 合金 3 的外层还可以看到少量 Mo, 但 Mo 在合金 3 底层外侧富集情况已经不明显; 合金 8 的氧化层中已经没有 Mo 的富集。结果表明: 随 Si 含量的增加, 低熔点 Mo 的氧化物的挥发被逐渐抑制。由 Si 的分布情况可以发现, 抗氧化性最佳的合金 8 的氧化层中富集了 Si 元素, 而且在 Laves 相中也产生富集。元素面扫描分析结果与 EDS 分析结果是一致的。

为进一步研究氧化过程, 利用 XRD 对合金表面氧化物进行了物相鉴定, 氧化物 XRD 谱如表 3 所示。

合金 1 与 2, 3 与 4, 5 与 6, 7 与 8 的氧化产物相似或相同。整体来看, 氧化物中普遍存在 Fe、Cr 氧化物。合金 1、2、5、6 中出现了含 Mo 的氧化物。而合金 3 和 4 的氧化外层只有极少量脱落, XRD 结果基本为最外层氧化物成分, 由于高温下挥发而未出现 Mo 的氧化物, 这与李正栋等^[15]的研究结果相一致。Si 含量达到 1.5% 后, 出现了 Fe、Si 氧化物。由于合金 7 和 8 的氧化层较薄, 故 XRD 谱中出现了基体的衍射峰。

3 分析和讨论

由以上实验结果可知, 不含 Si 的合金 1 在高温氧化环境中与 O₂ 反应, 生成了少量的 MoO₃ 和以铁、铬、镍的氧化物(Fe₃O₄、Fe₂O₃、NiFe₂O₄、(Fe_{0.6}Cr_{0.4})₂O₃

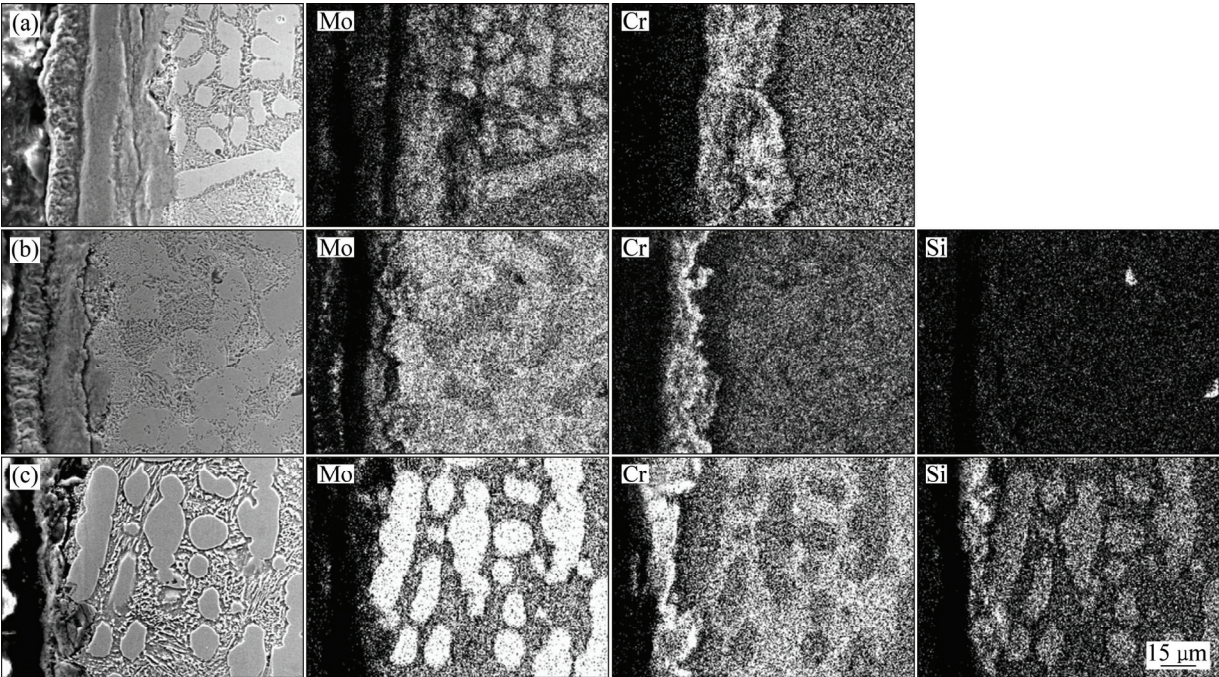


图 6 800 °C 静态氧化 184 h 后的退火态合金截面的组织和元素面分布

Fig. 6 Microstructures and element map distribution on cross section of annealed alloys after static oxidation at 800 °C for 184 h: (a) Alloy 1; (b) Alloy 3; (c) Alloy 8

表 3 800 °C 静态氧化 184 h 后合金中产生的主要氧化物

Table 3 Main oxides determined by XRD in alloys after static oxidation at 800 °C for 184 h				
Alloy 1 and 2	Alloy 3 and 4	Alloy 5 and 6	Alloy 7	Alloy 8
FeMoO ₄ /NiMoO ₄	Fe ₃ O ₄ /NiFe ₂ O ₄	Fe ₃ O ₄ /NiFe ₂ O ₄	Fe ₃ O ₄ /NiCr ₂ O ₄	Fe ₃ O ₄ /NiCr ₂ O ₄
Fe ₂ O ₃ /CrO ₃	Fe ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ /CrO ₃	Fe ₂ O ₃ /CrO ₃
(Fe _{0.6} Cr _{0.4}) ₂ O ₃	(Fe _{0.6} Cr _{0.4}) ₂ O ₃	(Fe _{0.6} Cr _{0.4}) ₂ O ₃	(Fe _{0.6} Cr _{0.4}) ₂ O ₃	Cr _{1.3} Fe _{0.7} O ₃
Cr _{1.3} Fe _{0.7} O ₃	Fe _{21.333} O ₃₂	NiMoO ₄	Fe ₂ (SiO ₄)	Fe _{2.30} Si _{0.70} O ₄
		Fe _{2.56} Si _{0.65} O ₄	Matrix: α-Fe, Laves phase	Matrix: α-Fe, Laves phase

等)为主的较为疏松的氧化层。最先形成的 MoO₃ 在高温不断挥发,随着氧化过程的进行,表层不断消耗 Mo,促使基体内的 Mo 向氧化层扩散,低熔点 MoO₃ 的挥发导致在表面形成了如图 7 所示的孔状的氧化物 (FeMoO₄, NiMoO₄),为 O₂ 进一步与样品反应提供了通道。在内氧化层中,由于 Cr 发生择优氧化,生成致密的 Cr₂O₃ 氧化膜,部分 Cr₂O₃ 与铁的氧化物发生固相反应生成(Fe_{0.6}Cr_{0.4})₂O₃,隆起形成许多小“山丘”,Cr 元素的优先氧化导致 Cr₂O₃/(Fe_{0.6}Cr_{0.4})₂O₃ 氧化膜/基体界面处的 Cr³⁺离子的贫化,其含量甚至低于外氧化向内氧化转变的临界值,合金中的 Cr³⁺离子与扩散到基体内部的 O²⁻发生内氧化^[16],形成了面扫描中的氧化底层。成分差异较大时氧化层之间的热膨胀系数不同^[17],最终外层氧化物破裂,出现孔洞、裂纹,或

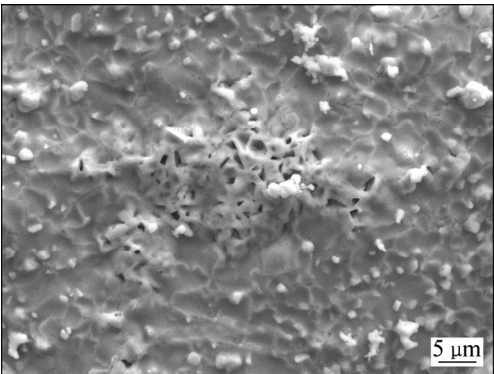


图 7 800 °C 静态氧化 184 h 后退火态合金 1 中孔状氧化物的形貌

Fig. 7 Morphologies of cavernous oxide of annealed alloy 1 after static oxidation at 800 °C for 184 h

与基体剥离。

随着合金中 Si 的加入, 导致基体中 Cr 含量的增加和 Mo 含量的降低, 致密 Cr_2O_3 氧化膜的形成增加了基体的抗氧化性, 减少了 Mo 的挥发。而随着 Si 占据 Laves 的间隙, 提高了其稳定性, 抑制了 Mo 扩散, 提高了强化相的抗氧化性。从总体上来看, Si 的加入有利于合金抗氧化性能的改善。但当 Si 含量低于 1.5% 时, 合金元素的作用还不足以完全抑制 MoO_3 的挥发, 导致在表面形成两层氧化膜和疏松外氧化膜的部分剥落。在此 Si 含量范围内, 随 Si 含量的增加, 氧化增量的增加是由于 MoO_3 的挥发减少所造成的。但当合金 Si 含量达到 1.5% 后, 致密 Cr_2O_3 的形成基本抑制了 MoO_3 的挥发, 避免了由于其挥发造成的氧化膜疏松的现象产生。随着 Si 的增加, 抗氧化性能得到进一步改善。特别是 Si 含量达到 3%~4% 后, 在氧化过程中, Cr 与 Si 在基体上迅速生成了两重氧化膜, 氧化层上出现的小鼓包主要由 $(\text{Cr}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_{1.3}\text{Fe}_{0.7}\text{O}_3)$ 组成, 致密连续。小包下为含 Si 氧化物 $\text{SiO}_2/\text{Fe}_{2.30}\text{Si}_{0.7}\text{O}_4$, 表面氧化膜中没有发现 Mo 的氧化物(见表 3)。避免低熔点 Mo 的氧化物的产生保证氧化膜平整连续且致密, 从而显著改善了合金的抗氧化性。

4 结论

1) Si 的加入改变了合金组织的形态和成分。随 Si 含量的增加, 合金的铸态组织由魏氏体组织变为枝晶组织, 而且基体中的 Cr 含量增加, Mo 含量降低, 在 Laves 相中, Mo 和 Si 含量明显增加。

2) Si 的加入改善了合金的抗氧化性, 但当 Si 含量较低时, 由于不能完全抑制 Mo 氧化物的产生和挥发, 导致表面氧化膜较为疏松或甚至出现剥落现象。

3) Si 的加入改善合金的抗氧化性的机理在于基体中 Cr 量的增加促进了致密 Cr_2O_3 氧化膜的形成, 而 Mo 和 Si 在 Laves 相中的富集增加了中间相的稳定性, 抑制了 Mo 的氧化与挥发。

4) Si 含量为 3%~4% 的合金具有优良的抗氧化性能。

REFERENCES

- [1] 胡壮麒, 孙文儒, 郭守仁, 卢德忠. 微量元素磷在铁镍基变形高温合金中的作用[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(6): 947-959.
HU Zhuang-qi, SUN Wen-ru, GUO Shou-ren, LU De-zhong. Effect of trace P on Fe-Ni based wrought superalloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(6): 947-959.
- [2] YAO M X, WU J B C, YICK S, XIE Y, LIU R. High temperature wear and corrosion resistance of a Laves phase strengthened Co-Mo-Cr-Si alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 435: 78-83.
- [3] YIN Fu-cheng, SU Xu-ping, ZHANG Ping. Phase relation of Fe-Mo-Cr-Ni alloy and triballoy design[C]//International Symposium of Young Scholars on Mechanics and Material Engineering for Science and Experiments, Changsha, 2001: 4.
- [4] 丁忠发. 基于 Laves 相强化的 Fe-Mo-Cr-Ni 耐磨合金组织与性能研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2014: 1-46.
DING Zhong-fa. Microstructures and properties research of Laves phase strengthened Fe-Mo-Cr-Ni wear-resistant alloys[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2014: 1-46.
- [5] 丁忠发, 尹付成, 李洁翡, 李智, 赵满秀. 成分及热处理工艺对 Fe-Mo-Cr-Ni 耐磨合金组织及性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2015, 36(7): 37-42.
DING Zhong-fa, YIN Fu-cheng, LI Jie-fei, LI Zhi, ZHAO Man-xiu. Effects of composition and heat treatment on microstructures and properties of Fe-Mo-Cr-Ni wear-resistant alloys[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2015, 36(7): 37-42.
- [6] 马艳红, 黄元伟. 硅含量对不锈钢耐蚀性能的影响[J]. 上海金属, 1999, 21(3): 52-57.
MA Yan-hong, HUNG Yuan-wei. The influence of Silicon content on corrosion resistance of stainless steel[J]. Shanghai Metals, 1999, 21(3): 52-57.
- [7] 李具仓, 赵爱民, 王丽娜. 硅对铁基合金组织和耐蚀性能的影响[J]. 腐蚀与防护, 2006, 27(10): 492-495.
LI Ju-cang, ZHAO Ai-min, WANG Li-na. Effect of Silicon on microstructure and corrosion resistance of iron-base alloys[J]. Corrosion & Protection, 2006, 27(10): 492-495.
- [8] 2000 HB. 钢及高温合金的抗氧化性测定试验方法[S].
2000 HB. The test method for steel and high temperature oxidation resistance of alloy[S].
- [9] CARTER R V, DOUGLASS D L, GESMUNDO F. Kinetics and mechanism of the sulfidation of Fe-Mo alloys[J]. Oxidation of Metals, 1989, 31(5/6): 341-367.
- [10] BECHTOLDT C J, VACHER H C. Phase-diagram study of alloys in the iron-chromium-molybdenum-nickel system[J]. Journal of Research of National Bureau Standards, 1957, 58(1): 7-19.
- [11] 李丽, 鲁晓宇, 代富平. 落管中 Fe-Mo-Si 三元包共晶合金的快速凝固机制[J]. 铸造技术, 2008, 29(5): 601-606.
LI Li, LU Xiao-yu, DAI Fu-ping. Rapid solidification mechanism of Fe-Mo-Si ternary quasiperitectic alloy in drop tube[J]. Foundry Technology, 2008, 29(5): 601-606.
- [12] 邹欣伟, 马勤, 贾建刚. Laves 相高温结构硅化物的研究进展[J]. 材料导报, 2008, 22(5): 85-88.

- ZOU Xin-wei, MA Qin, JIA Jian-gang. Research developments of Laves phase high temperature structural silicides[J]. *Materials Review*, 2008, 22(5): 85–88.
- [13] 谢红波, 刘贵仲, 郭景杰. Mn, V, Mo, Ti, Zr 元素对 AlFeCrCoCu-X 高熵合金组织与高温氧化性能的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2015, 25(1): 103–110.
- XIE Hong-bo, LIU Gui-zhong, GUO Jing-jie. Effects of Mn, V, Mo, Ti, Zr elements on microstructure and high temperature oxidation performance of AlFeCrCoCu-X high-entropy alloys[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2015, 25(1): 103–110.
- [14] 李青, 宋尽霞, 肖程波, 王定刚, 余乾, 韩雅芳. 一种高 W、Mo 含量 Ni3Al 基合金的高温氧化行为[J]. *航空材料学报*, 2007, 27(2): 6–12.
- LI Qing, SONG Jin-xia, XIAO Cheng-bo, WANG Ding-gang, YU Qian, HAN Ya-fang. The high temperature oxidation behavior of Ni3Al base alloy with high W, Mo content[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2007, 27(2): 6–12.
- [15] 李正栋, 张国庆, 赵宇新, 贾新云. 合金元素对 Ni-Mo-Cr 系低膨胀高温合金抗氧化性能的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2005, 15(2): 238–241.
- LI Zheng-dong, ZHANG Guo-qing, ZHAO Yu-xin, JIA Xin-yun. Effects of alloying elements on high temperature oxidation resistance of Ni-Mo-Cr system superalloys[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2005, 15(2): 238–241.
- [16] 林盼盼. GH5188 合金高温氧化性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012: 58.
- LIN Pan-pan. Research for high temperature oxidation properties of GH5188 superalloy[D]. Harbin: Harbin Industrial University, 2012: 58.
- [17] HAUL R, DUMBGEN G. Investigation of oxygen diffusion in TiO₂, quartz and quartz glass by isotope exchange[J]. *Bunsen Society for Physical Chemistry*, 1962, 66(8/9): 636–641.
- (编辑 龙怀中)