

Ta 含量对镍基粉末高温合金高温氧化性能的影响

杨志昆¹, 王浩¹, 张义文², 胡本芙¹

(1. 北京科技大学 材料科学与工程学院, 北京 100083)

(2. 北京钢研高纳科技股份有限公司, 北京 100081)

摘要: 采用 XRD、FEG-SEM 和 EDS 等实验技术对不同 Ta 含量合金在 800 °C 条件下进行抗氧化性能的研究。结果表明, 含 Ta 合金的氧化增重和氧化时间的关系曲线符合抛物线规律, 氧化层为 $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{NiCr}_2\text{O}_4+\text{Ta}_2\text{O}_5+(\text{Ti}/\text{Cr})\text{TaO}_4$ 的复合氧化物结构, 而随着 Ta 含量的增加, 氧化层厚度减小, 且氧化深度变浅, 氧化层也变得更加平滑而致密。实验发现, 在外层和内层氧化层之间存在富 Ta 的氧化物 Ta_2O_5 、 $(\text{Ti}/\text{Cr})\text{TaO}_4$, 很容易与 Cr_2O_3 结合形成 CrTaO_4 , 从而减少高温下 Cr_2O_3 氧化物的挥发损失, 提高合金的抗氧化性能。富 Ta 氧化物 Ta_2O_5 、 $(\text{Ti}/\text{Cr})\text{TaO}_4$ 的出现能阻碍金属阳离子向外扩散的速率, Ta 元素的加入改变了氧化层离子扩散速率从而提高了合金的抗氧化性能。

关键词: 粉末高温合金; Ta; 高温氧化; 氧化产物

中图分类号: TG146.1⁺5

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2021)09-3233-09

先进航空发动机涡轮盘用合金通常在温度 540~850 °C 下工作, 因而要求材料具有优良的力学性能和热组织稳定性。镍基粉末高温合金由于在高温下表现出一系列优异的性能, 可有效保证发动机可靠性和安全性, 随着航空发动机推重比的提高, 先进发动机涡轮前工作温度已高达 1750 °C 左右, 这需要合金材料具有较高的承温能力和高温下良好的组织稳定性。因此, 作为涡轮盘合金, 优异的高温抗氧化性能显得十分重要^[1-4]。

经过几十年的发展, 粉末高温合金已经研究到了第 3 代, 第 3 代镍基粉末高温合金一个显著的成分特点是加入了 Ta 元素。Ta 元素的加入不仅对合金力学性能有影响^[5-7], 对合金的高温氧化性能也有重要影响。镍基高温合金中主要的抗氧化元素是 Cr 和 Al, 而 Ta 元素的加入既可以提高合金的力学性能, 加入适量的 Ta 还可以有效改善合金的高温抗氧化性能^[8-10]。研究表明, 含 Ta 镍基高温合金的经过高温氧化后, 合金的氧化层主要分为 3 层, 外层为 Cr_2O_3 和 NiO 或者反应生成的尖晶石氧化物, 内层主要是 Al_2O_3 , 中层主要是含有 Ti、Ta 和 Cr 的尖晶石氧化层, 例如 NiCr_2O_4 、 $(\text{Cr}, \text{Ti})\text{TaO}_4$ 和 NiTa_2O_6 等^[11-14]。韩汾汾等人^[10,13]发现一种镍基高温合金在高温氧化过程中随着 Ta 元素的增加, 由于 $(\text{Cr}/\text{Ti})\text{TaO}_4$ 的生成量增加且分布更加连续

致密, 有效降低离子的迁移速率, 可以提高合金的抗氧化性能^[10,13]。Ren 等人^[14]发现 Ta 在合金氧化过程中形成 $(\text{Cr}/\text{Ti})\text{TaO}_4$ 能够有效降低离子的扩散能力, 使合金氧化动力学曲线由抛物线改变为立方曲线, 提高了合金抗氧化性能。而黄炎等人^[15]研究了一种定向凝固的镍基高温合金在 850 °C 时的高温氧化行为, 发现 Ta 的加入能减少合金的氧化增重和延缓氧化膜的剥落, 提高合金的抗氧化性能。Park 等人^[16]发现 Ta 对镍基高温合金的高温氧化性能影响主要取决于 Al 元素的含量和氧化温度, 根据条件的不同, Ta 添加既可以提高合金的高温抗氧化性能, 也可以破坏合金的高温抗氧化性能^[16]。根据已有研究结果可知, 前期研究主要集中在添加 Ta 元素后对合金抗氧化性能及氧化膜的组成方面的影响, 而对合金中添加不同含量的 Ta 元素在 800 °C 高温条件下抗氧化性能及氧化膜结构和组成缺乏系统研究, 合金多层氧化膜之间的相互转化鲜有报道。本工作通过在合金中添加不同含量的 Ta 元素, 注重研究合金抗氧化性能和氧化层结构组成及含 Ta 量之间的关系, 以期加入 Ta 元素对改善工艺条件和合金组织热稳定性提供相应理论依据。

1 实验

以 FGH98 合金为基础, 设计 5 种不同 Ta 含量合

收稿日期: 2020-09-15

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFB0700505)

作者简介: 杨志昆, 男, 1995 年生, 硕士, 北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083, 电话: 010-62334314, E-mail: yangzhikun_yzk@163.com

金, 分别为 0%、1.2%、2.4%、3.6%、4.8% (质量分数, 下同), 其中 Ta 含量为 2.4% FGH98 合金采用的主要成分见表 1。

真空感应熔炼母合金, 采用等离子旋转电极法 (PREP) 制备合金粉末。经过筛分与除夹杂处理后, 将粒度约 50 μm 的纯净粉末装入不锈钢包套, 热等静压成型(1160~1180 °C/120 MPa), 然后在 1180 °C 进行固溶处理, 再经 2 次时效处理, 最后时效温度为 760 °C。

根据 HB 5258-2000 标准采用增重法来进行高温氧化试验。将热处理后的合金切成 8 mm×8 mm×10 mm 的块状样品, 用砂纸打磨后用无水乙醇或丙酮超声洗涤, 烘干后称重记录。将氧化铝坩埚放入高温炉中焙烧, 焙烧温度高于试验温度 50 °C, 将坩埚烧至前后 2 次质量称量差值不大于 0.0002 g, 则认定为恒重, 记录恒重值。将称重完的试样与预处理后的坩埚配对, 并一起称重记录, 做好标记, 一起放入高温炉中进行高温氧化试验。按试验周期固定出炉并盖上坩埚盖防止氧化皮外溅, 后迅速冷却至室温并称重记录。然后, 采用 XRD、SEM、EDS 等手段对氧化前后试样表面进行物相分析以及对剖面的显微组织进行观察。氧化试验条件为: 试验温度为 800 °C,

保温时间为 100、500、1000 h。

2 结果与分析

2.1 合金显微组织

图 1 给出了不同合金热处理后的显微组织, 其中右上角为 γ'相组织。随着 Ta 含量的增加, 不同合金的平均晶粒尺寸在 29~38 μm 之间, Ta 对合金晶粒尺寸有一定影响但影响不大, 且合金中原始颗粒边界(PPB)消失。合金中的 γ'相主要由二次 γ'相和其颗粒间分布的三次 γ'相组成。可以看出, 随着合金中 Ta 含量的增加, 三次 γ'相的数量和尺寸增加, Ta 元素可促进合金三次 γ'相的析出; 合金中二次 γ'相的尺寸增大, 其形貌发生改变, 从圆形、椭圆形向八重立方体形态改变, 当合金 Ta 含量增加到 3.6% 时, 二次 γ'相形态开始变得不稳定, 边界向里凹陷, 开始发生分裂, Ta 含量为 4.8% 时, 二次 γ'相分裂几乎已经完成。

2.2 氧化动力学曲线

图 2 给出了 5 种合金 800 °C 下的氧化动力学曲线。可以看出各含 Ta 元素合金氧化增重和时间的关系曲线都符合抛物线规律, 在氧化开始阶段, 氧化增重比较快,

表 1 FGH98 合金成分

Table 1 Chemical composition of FGH98 alloy (wt%)

C	Cr	Co	Mo	W	Al	Ti	Nb	Ta	B	Zr	Ni
0.05	12.7	20.4	2.6	3.8	3.5	3.70	0.9	2.4	0.02	0.045	Bal.

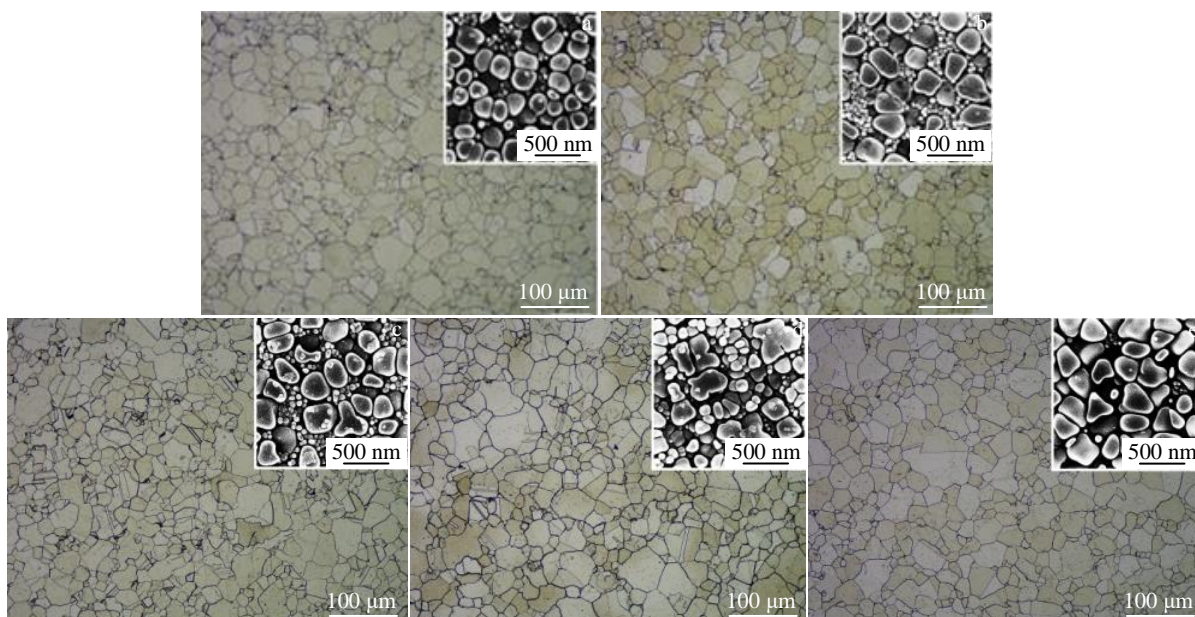


图 1 不同 Ta 含量合金热处理后的显微组织

Fig.1 Microstructures of alloys with different Ta contents after heat treatment: (a) 0%, (b) 1.2%, (c) 2.4%, (d) 3.6%, and (e) 4.8%

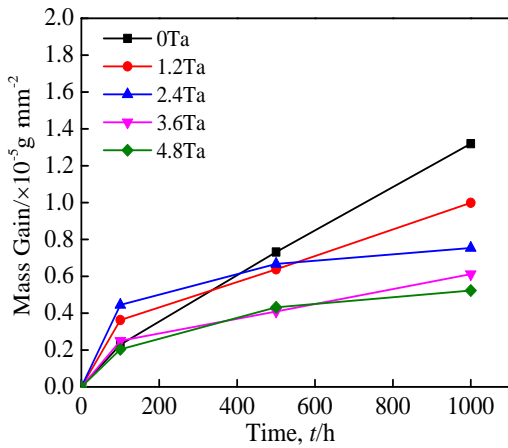


图 2 不同 Ta 添加量合金在 800 °C 条件下的氧化动力学曲线
Fig.2 Oxidation kinetic curves of alloys with different Ta contents at 800 °C

随着氧化时间的延长,氧化膜增厚,离子的扩散速率降低,氧化增重量越来越小,氧化速率减慢。据图 2 可知,在氧化初期(100 h),含 Ta 合金与无 Ta 合金氧化速率差距不明显。随着氧化时间的增加,Ta 元素含量对合金氧化速率有明显影响,但合金氧化动力学曲线的抛物线特征并没有改变,且随着合金内 Ta 元素含量的增加,合金的氧化速率越来越小。

2.3 合金氧化速率常数

根据 Wagner 氧化理论和以往研究,合金的氧化符合抛物线规律^[17,18]:

$$\Delta m^2 = k_p t \tag{1}$$

式中, Δm 为单位面积的氧化质量增重; k_p 为抛物线氧化速率常数; t 为氧化时间。对上式两边取对数有:

$$\ln t = 2 \ln \Delta m - \ln k_p \tag{2}$$

进行线性拟合得出抛物线氧化速率常数,结果见表 2。含 Ta 合金与无 Ta 合金相比,氧化速率常数均较慢,尤其是高 Ta 含量合金氧化速率降低更明显,即随着合金中 Ta 含量的增加,合金氧化速率急剧降低,合金的抛物线氧化速率常数 k_p 明显减小,与加入 Ta 含量多少呈非线性关系。结果表明,添加 Ta 元素的合金有利于提高合金的抗氧化性能。

2.4 合金氧化层厚度与氧化深度

截取试样横截面进行组织观察,并测定氧化层厚度和氧化深度,其结果如图 3 和图 4 所示。图 3 给出了不同 Ta 含量合金氧化 100、500 和 1000 h 后的氧化膜剖面组织形貌。可以看到,合金在氧化 100 h 后,无 Ta 合金氧化膜厚度较大,随着 Ta 含量的增加氧化膜厚度减小,高 Ta 合金氧化膜厚度薄而且平坦整齐;氧化时间为 500 h 时,氧化

表 2 不同 Ta 含量合金在 800 °C 条件下氧化抛物线速率常数

Table 2 Oxidation parabolic rate constants (k_p) of alloys with different Ta contents at 800 °C

Ta content, $\omega/\%$	$k_p/\times 10^{-4} \text{ mg}^2 (\text{cm}^2 \text{ h})^{-1}$
0	19.1
1.2	9.72
2.4	4.05
3.6	3.50
4.8	2.54

深度在 Ta 含量为 1.2%~3.6% 合金中增大,氧化膜的厚度则随着 Ta 含量的增加而逐渐减薄;在氧化 1000 h 后,无 Ta 合金氧化膜厚度急剧增加,而含 Ta 合金氧化膜厚度随着 Ta 含量的增加明显减小,氧化深度也减小,显示出良好的抗氧化性。氧化层厚度与氧化深度测量结果如图 4 所示。

2.5 合金氧化产物相组成

合金在 800 °C 温度下氧化不同时间后的相产物组成如图 5 所示。从图 5 可以看出:氧化 100 h 时, 2θ 角在 20°~80° 之间,合金的特征衍射峰基本一致,只是在峰的强度上有差别, 2θ 角在 20°~45° 之间合金显示出 (Ni/Co)Cr₂O₄ 尖晶石的特征峰,氧化膜主要由 Cr₂O₃、Al₂O₃、TiO₂、Ta₂O₅(含 Ta 合金)和少量 NiO 组成多相氧化物;氧化 500 h 后,在 2θ 角 20°~40° 之间,合金氧化物特征峰仍是 (Ni/Co)Cr₂O₄ 尖晶石,氧化膜中有高强度氧化物峰值 (Ti/Cr)TaO₄ 出现,还有 Cr₂O₃、TiO₂、Ta₂O₅ 等氧化产物;氧化 1000 h 后, 2θ 角在 20°~40° 之间出现 (Ti/Cr)TaO₄ 特征峰,氧化膜有 Cr₂O₃、NiTiO₃、NiO 等产物,而 (Ni/Co)Cr₂O₄ 尖晶石氧化物一直存在,但强度明显减弱。

2.6 合金氧化产物相成分分析

图 6 和表 3 是采用 SEM 和 EDS 分析的不同含 Ta 量合金氧化 1000 h 氧化层横剖面氧化物形貌和元素组成。可以看到,氧化层深度区域合金的氧化膜形貌不尽相同,表 3 给出了不同合金氧化 1000 h 后的各元素含量。对照图 5 中不同 Ta 含量合金氧化不同时间后表面层氧化物的 X 射线衍射图谱和组成,分析图 6 内氧化物,无 Ta 合金最外层为富 Cr 层,主要由连续的氧化物 Cr₂O₃ 组成,还有少量的 TiO₂ 和 (Ni/Co)Cr₂O₄, 内层主要为氧化物 Al₂O₃; 而含 1.2% Ta 合金表层氧化物几乎没有变化,而在内层出现 (Ti/Cr)TaO₄ 和 NiO 颗粒, Ta 含量为 2.4% 的合金最外层为连续的 NiCr₂O₄, 最内层由分散的 Al₂O₃ 膜,外层和内层之间出现了 CrTaO₄; 3.6% 和 4.8% Ta 合金中 CrTaO₄ 氧化物一直存在,而且更加连续。

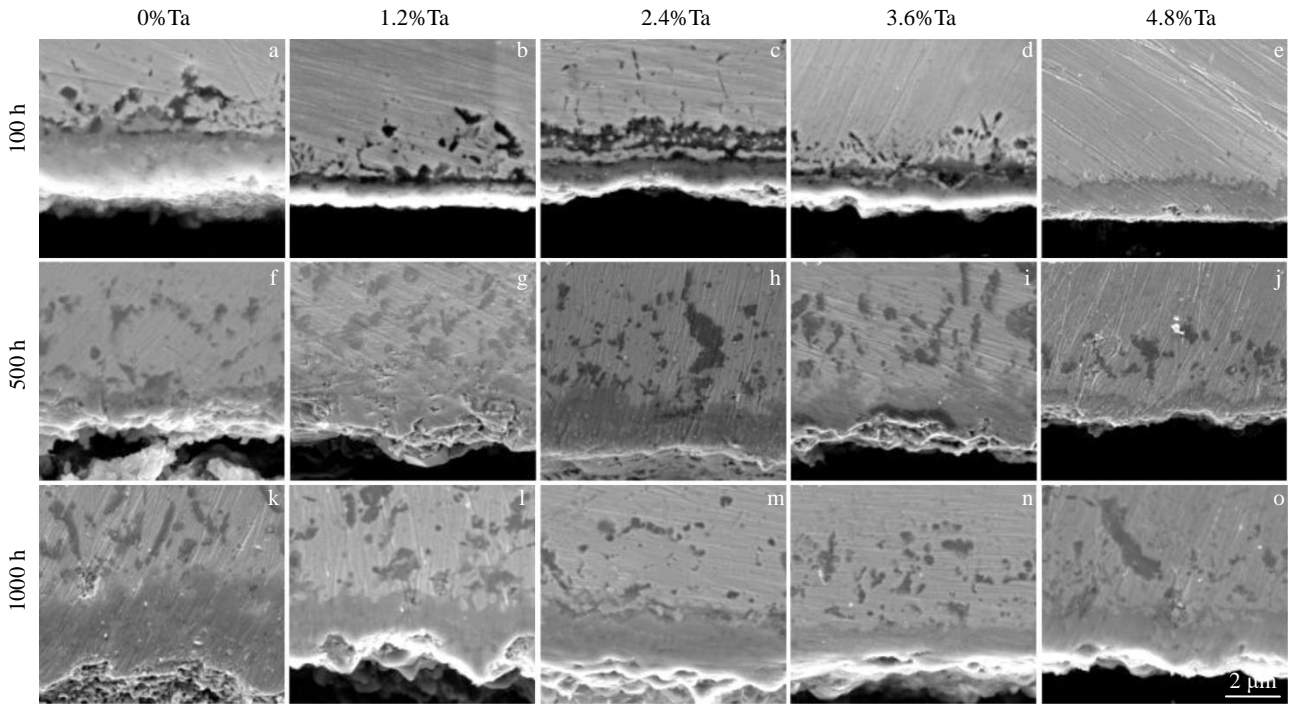


图 3 不同 Ta 含量合金在 800 °C 氧化不同时间后氧化膜的剖面形貌

Fig.3 Cross-sectional morphologies of the oxidized film of alloys with different Ta contents at 800 °C for different oxidation time

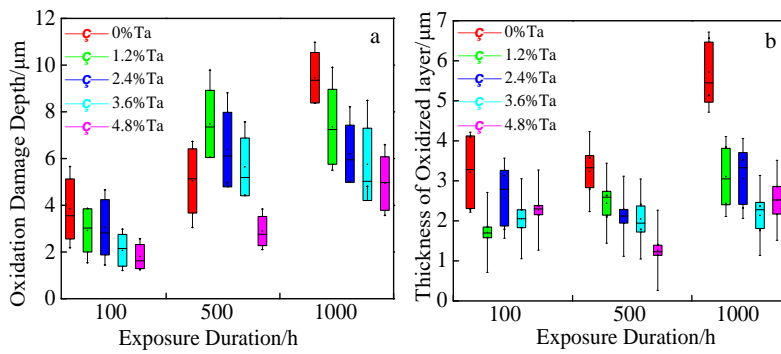


图 4 不同 Ta 含量合金 800 °C 条件下氧化不同时间的氧化深度与氧化层厚度

Fig.4 Oxidation depth (a) and oxide layer thickness (b) of alloys with different Ta contents at 800 °C for different oxidation time

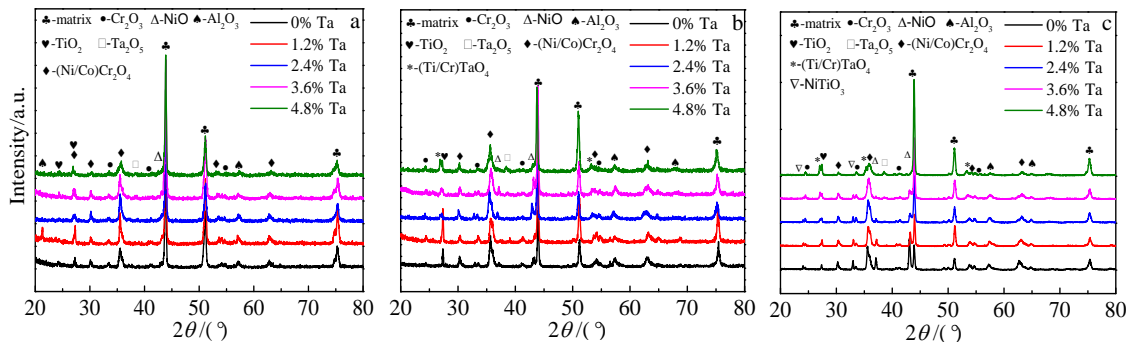


图 5 不同 Ta 含量合金在 800 °C 氧化不同时间后的 XRD 图谱

Fig.5 XRD patterns of alloys with different Ta contents at 800 °C for different oxidation time: (a) 100 h, (b) 500 h, and (c) 1000 h

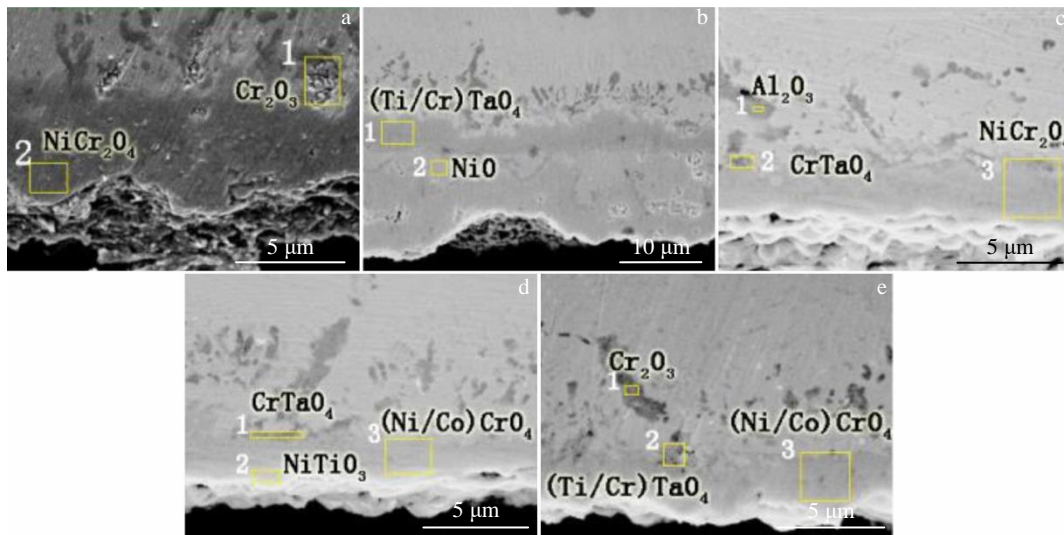


图 6 不同 Ta 含量合金氧化 1000 h 后氧化物的 SEM 照片及 EDS 分析

Fig.6 SEM images and EDS analysis region of alloys with different Ta contents after oxidation for 1000 h: (a) 0%, (b) 1.2%, (c) 2.4%, (d) 3.6% and (e) 4.8%

表 3 图 6 中 5 种合金氧化 1000 h 的氧化膜不同区域的氧化物 EDS 成分分析

Table 3 EDS analysis results of the different regions of the oxide film in Fig.6

Ta content, ω/%	Region	Ni	O	Cr	Al	Ta	Ti	Co
0	1	4.26	30.14	53.79	1.03	-	-	10.78
	2	24.24	21.05	28.27	3.05	-	17.51	5.88
1.2	1	9.64	61.30	16.82	1.50	0.27	5.76	4.70
	2	52.84	46.33	0.83	-	-	-	-
2.4	1	26.31	48.96	1.63	13.94	-	-	9.16
	2	8.83	60.18	12.79	6.61	2.71	1.77	7.11
	3	6.35	61.49	18.90	2.19	1.18	2.16	7.73
3.6	1	-	70.20	17.46	7.65	2.87	1.82	-
	2	15.61	61.30	4.83	1.22	0.21	9.80	7.03
	3	5.98	63.44	16.19	2.53	1.52	3.64	6.70
4.8	1	4.55	66.25	25.65	-	-	-	3.55
	2	6.16	60.68	12.78	5.96	7.35	3.24	3.83
	3	9.19	60.10	17.78	1.93	0.98	2.22	7.80

2.7 不同 Ta 含量合金长时间氧化后的元素面分布

图 7 和图 8 分别展示了不同合金在氧化 500 h 和 1000 h 后各的 EDS 元素面分布图。可以发现, 最外层的富 Cr 层, 主要由连续的 Cr₂O₃ 组成, 还有少量的 TiO₂ 和(Ni/Co)Cr₂O₄, 在氧化 1000 h 后还有 NiTiO₃ 形成, 而最内层主要由 Al₂O₃ 组成。含 Ta 合金中, 在最外层和最内层氧化膜之间还有一层富 Ta 层氧化膜, 这层氧化膜主

要是 Ta₂O₅ 和(Ti/Cr)TaO₄, 与 XRD 图谱结果是一致的; 合金在氧化 500 h 后, 内层 Al₂O₃ 分布比较分散, 而富 Cr 层连续致密, 富 Ta 氧化物分布较为分散, 但在高 Ta 合金 Ta 含量(4.8%)中的富 Ta 氧化物趋于连续和致密; 合金在氧化 1000 h 后, 合金的 Al₂O₃ 增加, 且更加集中, 但无 Ta 合金的 Al₂O₃ 还是分散不连续的, 而在含 Ta 合金中的氧化膜内层有一层薄薄的连续 Al₂O₃, 附近有分

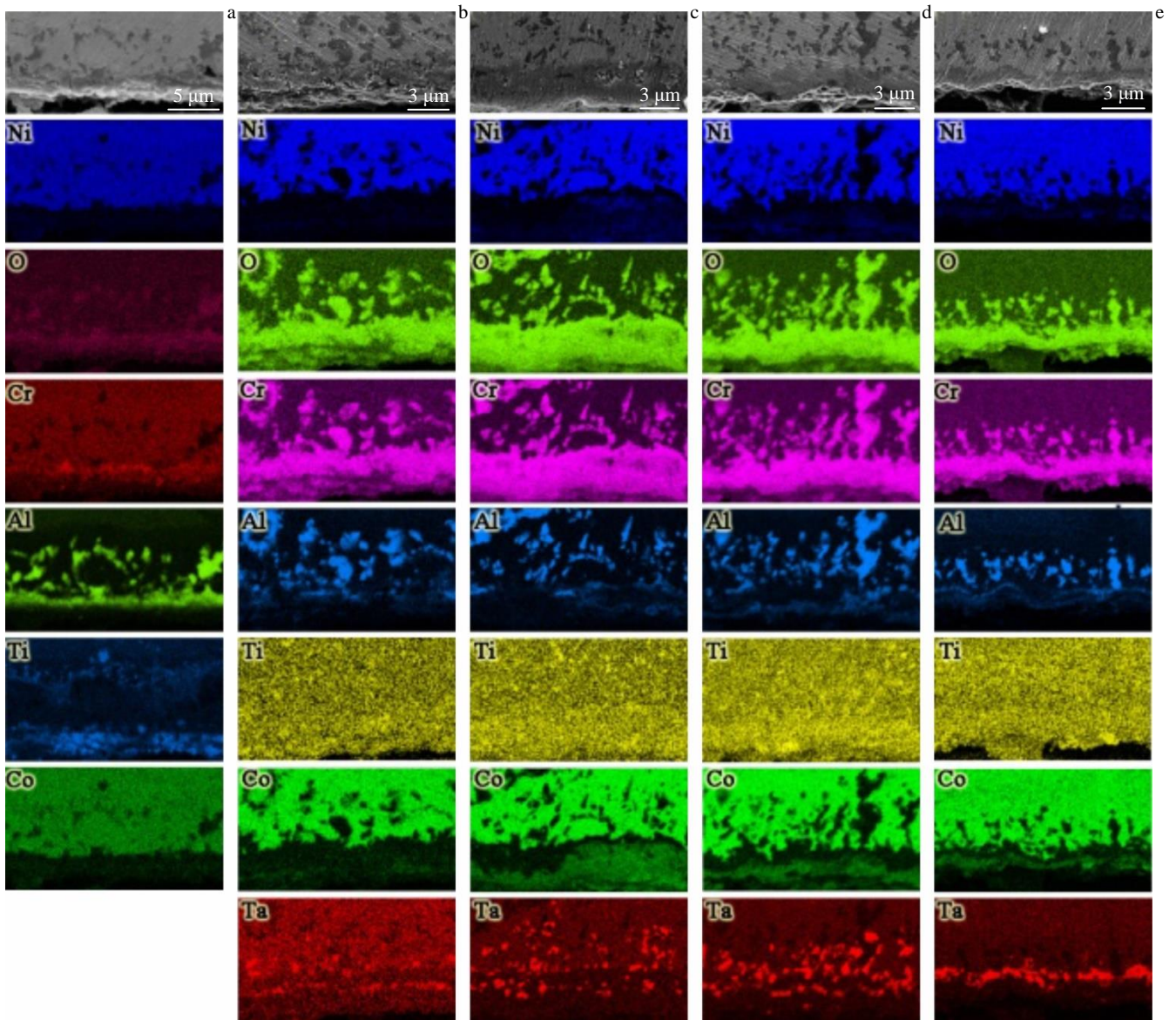


图 7 5 种不同 Ta 含量合金氧化 500 h 时氧化膜的 SEM 照片及 EDS 元素面分布

Fig.7 SEM images and EDS element mapping of the oxide film of alloys with different Ta contents after oxidation for 500 h: (a) 0% Ta, (b) 1.2% Ta, (c) 2.4% Ta, (d) 3.6% Ta, and (e) 4.8% Ta

散 Al_2O_3 附着。随着 Ta 含量的增加，合金氧化膜厚度减小，富 Cr 层厚度也减小，富 Ta 氧化物较 500 h 更加集中连续，而且随着 Ta 含量的增加，富 Ta 层增厚，更加致密。图 7、图 8 的元素面分布都证明 Ta 元素的加入对氧化层的形成有良好的作用。

3 讨论

3.1 合金氧化动力学曲线

从实验合金氧化增重的平方与氧化时间的关系表明：含 Ta 合金在温度 800 °C 下氧化动力学均遵循抛物线规律，线性相关性良好，可从起始瞬间增重求出该温度

下抛物线氧化速率常数 k_p ，其结果见表 2。可以看出，随着合金含 Ta 量的增加， k_p 随之明显减小，表明氧化初期向稳态期转变，这一转变过程说明含 Ta 量低时，氧化物形成质点较多，氧化速率较快，氧化膜生长很快进入稳态期，并且较平直致密，阻碍反应离子的扩散，氧化速率下降很快，如含 Ta 量为 4.8% 的合金的抛物线氧化速率常数只有 $2.54 \times 10^{-4} \text{ mg}^2 (\text{cm}^4 \text{ h})^{-1}$ ，说明加入 Ta 元素可有效提高 FGH98 合金抗氧化性能。

3.2 合金氧化产物形貌及组成分析

结合合金氧化层的 XRD 图谱和氧化膜 EDS 分析，合金出现氧化物复合结构，其中无 Ta 合金氧化膜主要由

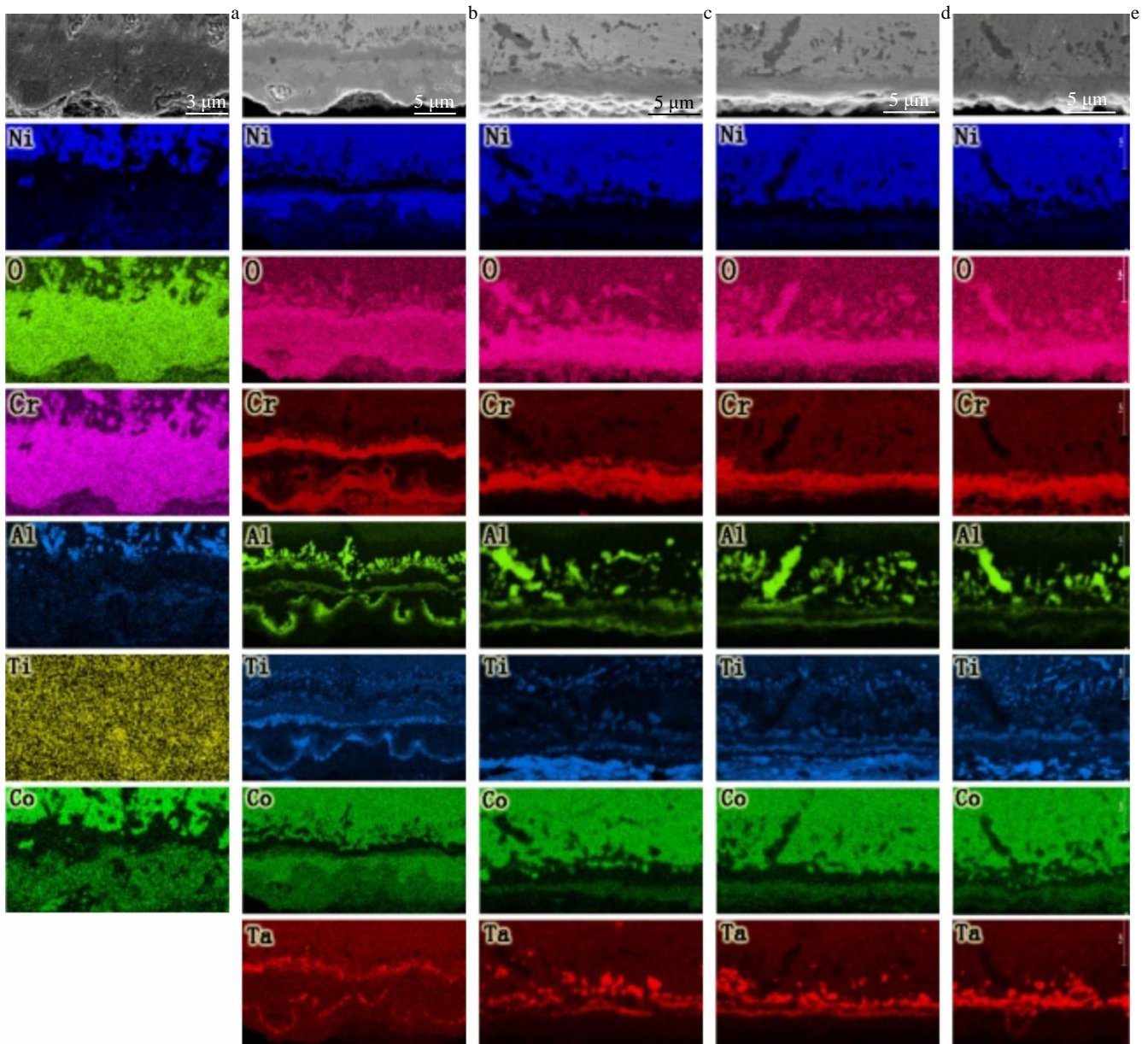


图 8 5 种不同 Ta 含量合金氧化 1000 h 时氧化膜的 SEM 照片及 EDS 元素面分布

Fig.8 SEM images and EDS element mapping of the oxide film of alloys with different Ta contents after oxidation for 1000 h: (a) 0% Ta, (b) 1.2% Ta, (c) 2.4% Ta, (d) 3.6% Ta, and (e) 4.8% Ta

内层分散的 Al_2O_3 和外层连续的 Cr_2O_3 和 TiO_2 以及 $(\text{Ni}/\text{Co})\text{Cr}_2\text{O}_4$ 组成。内层 Al_2O_3 分散不连续的原因是氧化初期合金表面形成 Cr_2O_3 ，随着氧化时间的延长，迅速形成连续致密的 Cr_2O_3 膜，阻碍了离子的扩散速率，导致短时间无法形成连续的 Al_2O_3 膜。而在含 Ta 合金中，在内层和外层氧化膜之间还有富 Ta 氧化物，主要是 Ta_2O_5 和 $(\text{Ti}/\text{Cr})\text{TaO}_4$ ，其中 Ta_2O_5 含量较少，因为 Ta_2O_5 很容易与 Cr_2O_3 结合形成 CrTaO_4 ^[10]，进而提高合金的抗氧化性能。合金在氧化 100 h 时，富 Ta 层几乎没有，随着时间的延长，到 500 h 时，出现了不连续的富 Ta 氧化

物，且随着 Ta 含量的增加而明显增加，氧化时间到了 1000 h 时富 Ta 层已经变得连续，富 Ta 氧化物的厚度明显增加。这说明氧化膜中 Ta_2O_5 和 $(\text{Ti}/\text{Cr})\text{TaO}_4$ 的形成与氧化时间有直接关系，这与 Ren^[14] 发现合金中 $(\text{Ti}/\text{Cr})\text{TaO}_4$ 层是在特定时间形成的结果相一致，说明 Ta_2O_5 和 $(\text{Ti}/\text{Cr})\text{TaO}_4$ 层阻碍了离子向外扩散的速率，从而提高合金的抗氧化性能。

根据图 3、图 6 和表 3 给出的 800 °C 各合金不同时间氧化物形貌及能谱分析可知，各合金氧化 1000 h 后都形成 Cr_2O_3 型保护性氧化膜，而在其下有一层由于氧化

引起的氧化影响区(深度),氧化物的形貌和深度有差异(图 3),由各氧化膜厚度和深度测量结果(图 4)可知,随着 Ta 含量的增加,氧化层厚度减少,而氧化深度减小,这与氧化动力学曲线规律一致,氧化层与合金基体交界处没有因合金元素向外扩散留下空洞,内氧化物形成类似手指状(或钉状)的结构,增加氧化膜与基体的附着性。能谱分析表明外层氧化膜主要由 Cr_2O_3 组成,内层含有 Al_2O_3 和 $(\text{Ti}/\text{Cr})\text{TaO}_4$ 组成,说明加入 Ta 元素可以增加 Cr、Ti、Al 元素的选择性氧化^[19],加速 $(\text{Ti}/\text{Cr})\text{TaO}_4$ 和 Al_2O_3 形成,抑制 Cr、Ti、Al 离子间合金元素的扩散。在镍基高温合金中加入 Ta 元素,其中大部分 Ta 元素进入 γ 相中,置换 Al、Ti,增加 Cr、Co 在 γ 相固溶体的溶解度,从热力学分析^[20],Ti 离子的迁移率远大于 Cr 离子的迁移速率,优先与 Ta 元素发生反应,较易形成 $(\text{Ti}/\text{Cr})\text{TaO}_4$ 等氧化产物。由此可知,Ta 元素加入合金中,提高氧的选择性氧化效应,降低 Al、Ti、Cr 通过氧化层向外扩散,降低氧化物的生成反应速率,因此提高合金的抗氧化性能。

4 结 论

1) 加入 Ta 元素的 FGH98 合金在 800 °C 条件下长时间氧化增重与时间呈抛物线动力学规律。

2) 不同 Ta 含量合金在经过 800 °C 不同时间氧化后复合氧化层氧化物相同,只是氧化层厚度和氧化深度不同,其中经过 1000 h 氧化后,外氧化层由连续的 $(\text{Ni}/\text{Co})\text{Cr}_2\text{O}_4+\text{Ta}_2\text{O}_5+(\text{Ti}/\text{Cr})\text{TaO}_4$ 膜组成。

3) 合金中加入 Ta 元素进入 γ 相中置换 Cr、Ti、Al,使它们进入 γ 固溶体,同时减少 γ 固溶体中氧的固溶度,提高氧的选择性氧化效应,内氧化产物的形成阻止 Cr、Ti、Al 元素通过氧化层向外扩散,降低氧化物的生成反应速率,因而提高合金抗氧化性。

参考文献 References

- [1] Wu Kai(吴 凯), Liu Guoquan(刘国权), Hu Benfu(胡本芙) *et al.* *Materials China*(中国材料进展)[J], 2010, 29(3): 23
- [2] Hu Benfu(胡本芙), Tian Gaofeng(田高峰), Jia Chengchang(贾成厂) *et al.* *Powder Metallurgy Technology*(粉末冶金技术)[J], 2009, 19(4): 292
- [3] Huang Hailiang(黄海亮), Liu Guoquan(刘国权), Wang Hao(王浩) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2019, 48(4): 1142
- [4] Zhang Ming(张 明), Liu Guoquan(刘国权), Wang Hao(王 浩) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2019, 48(10): 3258
- [5] Wang Zhicheng(王志成), Wang Hao(王 浩), Liu Guoquan(刘国权) *et al.* *Chinese Journal Materials Research*(材料研究学报)[J], 2019, 33(5): 331
- [6] Xing Pengyu(邢鹏宇), Zhang Yiwen(张义文), Jia Jian(贾 建). *Powder Metallurgy Industry*(粉末冶金工业)[J], 2019, 29(2): 33
- [7] Wu C J, Tao Y, Jia J. *Journal of Iron and Steel Research, International*[J], 2014, 21(12): 1152
- [8] Yun D W, Seo S M, Jeong H W *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2017, 710: 9
- [9] Sato A, Chiu Y L, Reed R C. *Acta Materialia*[J], 2011, 59(1): 225
- [10] Han Fenfen(韩汾汾), Li Hui(李 辉), Zhang Jian(张 健) *et al.* *Journal of Iron and Steel Research*(钢铁研究学报)[J], 2011, 23(2): 416
- [11] Brennen J, Wei J, Sun Z *et al.* *Corrosion Science*[J], 2015, 100: 267
- [12] Liu C T, Ma J, Sun X F. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2015, 491: 522
- [13] Han F F, Chang J X, Li H *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2015, 619: 102
- [14] Ren W L, Ouyang F, Ding B *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2017, 724: 565
- [15] Huang Yan(黄 炎), Wang Lei(王 磊), Liu Yang(刘 杨) *et al.* *Journal of Iron and Steel Research*(钢铁研究学报)[J], 2011, 23(2): 408
- [16] Park S J, Seo S M, Yoo Y S *et al.* *Corrosion Science*[J], 2015, 90: 305
- [17] Liu F J, Zhang M C, Dong J X *et al.* *Acta Metallurgica Sinica*[J], 2007, 20(2): 102
- [18] Lei Z, Zhang M C, Dong J X. *Applied Surface Science*[J], 2010, 256(24): 7510
- [19] Guo Jianting(郭建亭). *Material Science and Engineering for Superalloy*(高温合金材料学应用基础理论篇)[M]. Beijing: Science Press, 2008: 586
- [20] Abe F, Araki H, Yoshida H *et al.* *Oxidation of Metals*[J], 1987, 27(1): 21

Effect of Ta Content on High Temperature Oxidation Performance of Nickel-based PM Superalloys

Yang Zhikun¹, Wang Hao¹, Zhang Yiwen², Hu Benfu¹

(1. School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

(2. Beijing CISRI-Gaona Materials Technology Co., Ltd, Beijing 100081, China)

Abstract: The oxidation resistance of superalloys (FGH98) with different Ta element contents at 800 °C was studied by XRD, FEG-SEM and EDS. The results show that the relationship between oxidation mass gain and oxidation time of Ta-containing alloys conforms to parabolic kinetics law, and the oxide layer is $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{NiCr}_2\text{O}_4+\text{Ta}_2\text{O}_5+(\text{Ti}/\text{Cr})\text{TaO}_4$ composite oxide structure. With the increase of Ta content, the thickness of the oxide layer decreases, the oxidation depth becomes thinner, and the oxide layer becomes smoother and denser. There is a Ta-rich oxide (Ta_2O_5 , $(\text{Ti}/\text{Cr})\text{TaO}_4$) between the outer layer and the inner oxide layer, which can easily combine with Cr_2O_3 to form CrTaO_4 , which reduces the volatilization loss of Cr_2O_3 oxide at high temperatures and improves the oxidation resistance of the alloy. The appearance of Ta-rich Ta_2O_5 and $(\text{Ti}/\text{Cr})\text{TaO}_4$ can hinder the out-diffusion rate of metal ions. The addition of Ta changes the ion diffusion rate of the oxide layer, improving the oxidation resistance of the alloy.

Key words: PM superalloys; Ta; high temperature oxidation; oxidation products

Corresponding author: Wang Hao, Professor, School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, P. R. China, Tel: 0086-10-62334314, E-mail: hwang@ustb.edu.cn