

· XXXX ·



Ta对Ni16Co10W8Cr5Al合金均质化过程中MC碳化物的影响

张宗浩¹, 冯浩¹, 李花兵¹, 朱红春¹, 曲敬龙², 罗志强³

(1 东北大学冶金学院, 沈阳 110819; 2 北京钢研高纳科技股份有限公司, 北京 100081;

3 四川钢研高纳锻造有限责任公司, 德阳 618000)

摘要:为研究Ta对Ni16Co10W8Cr5Al合金在1 200 °C均质化过程中MC碳化物演化行为的影响,试验通过热力学计算、显微组织观察、图像统计及能谱分析,揭示了Ta对MC碳化物在1 200 °C均质化10 h后的成分变化以及粗化的影响。从热力学计算来看,Ta的加入提高了MC碳化物的稳定性及完全溶解温度;统计结果显示,在1 200 °C热处理10 h后,合金中MC碳化物的面积占比与尺寸均增加,但是0Ta合金中的碳化物变化明显大于2Ta合金;能谱面扫描结果显示,MC碳化物核部和壳层中C元素分布基本一致,说明核-壳结构主要来源于Ti、Nb、Ta、W、Mo等金属元素在MC颗粒核/壳区域中的分布差异。添加Ta后,Ta在MC碳化物区域明显富集,并改变Ti、Nb、W、Mo等金属元素的分配,使MC颗粒呈现Ti-Nb-Ta多元富集特征,提高了MC碳化物的稳定性,并抑制了均质化过程中的粗化行为。综合来看,Ta的加入提高了碳化物的稳定性,减缓了均质化过程中的元素再分配与粗化。

关键词:Ni16Co10W8Cr5Al高温合金; MC碳化物; Ta; 均质化; 核-壳结构

DOI:10. 20057/j. 1003-8620. N260129 **中图分类号:**TG142. 7

Effect of Ta on MC Carbides during Homogenization of Ni16Co10W8Cr5Al Alloy

Zhang Zonghao¹, Feng Hao¹, Li Huabing¹, Zhu Hongchun¹, Qu Jinglong², Luo Zhiqiang³

(1 School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2 Beijing CISRI-Gaona Materials & Technology Co., Ltd., Beijing 100081, China; 3 Sichuan CISRI-Gaona Forging Co., Ltd., Deyang 618000, China)

Abstract: To investigate the effect of Ta addition on the evolution of MC carbides in the Ni16Co10W8Cr5Al alloy during homogenization at 1 200 °C and to elucidate the role of Ta in the stability of MC carbides, thermodynamic calculations, microstructural observations, image statistical analysis, and energy-dispersive spectroscopy (EDS) were used. The results revealed the effect of Ta on the compositional changes and coarsening of MC carbides after homogenization at 1 200 °C for 10 h. Thermodynamic calculations indicated that the addition of Ta enhanced the stability of MC carbides and increased their complete dissolution temperature. Statistical results showed that, after heat treatment at 1 200 °C for 10 h, both the area fraction and size of MC carbides increased; however, the changes in MC carbides in the 0Ta alloy were significantly greater than those in the 2Ta alloy. EDS elemental mapping revealed that the distribution of C was essentially consistent between the core and shell regions of the MC carbides, indicating that the core-shell structure mainly originated from the different distributions of metallic elements, including Ti, Nb, Ta, W, and Mo, between the core and shell regions. After Ta addition, Ta was evidently enriched in the MC-carbide regions and altered the distribution of Ti, Nb, W, and Mo, giving the particles a Ti-Nb-Ta multicomponent enrichment characteristic, thereby enhancing their stability and suppressing their coarsening during homogenization. Overall, Ta addition improved the stability of the MC carbides and retarded elemental redistribution and carbide coarsening during homogenization.

Key Words: Ni16Co10W8Cr5Al Superalloy; MC Carbides; Ta; Homogenization; Core-shell Structure

随着航空工业的发展,飞机发动机推重比的不断提高导致涡轮的燃气温度不断提升,而过高的燃气温度直指材料的高温性能软肋^[1]。为满足先进航空发动机对高温材料的需求,人们迫切需要一种生

产成本低且在800~1 000 °C能保持优异性能的高温材料。

为了提高高温合金的耐温能力,镍基高温合金中加入了大量的难熔金属(如Mo、W、Ta等)作为固

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(52534007)

作者简介: 张宗浩(2001—),男,硕士; E-mail: 15562595037@163.com; 收稿日期: 2026-08-17

通信作者: 曲敬龙(1975—),男,博士,正高级工程师; E-mail: qujinglong@cisri.cn

Editorial Office of Special Steel. OA under CC BY-NC-ND 4.0

溶强化元素^[2],这些元素在提高高温合金强度的同时,也加重了合金的元素偏析,促进碳化物的形成,严重影响了高温合金性能^[3]。Ni16Co10W8Cr5Al合金是一种拥有高 γ' 相的镍基变形高温合金,其大量的强化相使其在高温下仍有较高的强度,具有广阔的应用前景^[4-5]。但是合金中大量的 γ' 强化相是一把双刃剑,其在大幅度提高高温强度的同时,还会恶合金的热变形能力,加大其生产制造难度^[5-6]。Ni16Co10W8Cr5Al合金中含有10% $w[W]$ 的同时, $w[C]$ 高达0.13%,这使得Ni16Co10W8Cr5Al合金中含有大量一次MC碳化物^[7-8]。已有研究表明,高钨镍基高温合金中的碳化物在长期热处理过程中会发生明显的成分与形貌演变^[9]。因此,Ni16Co10W8Cr5Al合金在锻造开坯之前通常会进行均质化处理来提高其热变形能力,改善锻造过程中的开裂情况^[10-12]。

Ta作为一种固溶强化元素的同时也是强碳化物形成元素,能够促进 γ' 相的生成,被广泛用于提高镍基高温合金的高温强度^[13]。已有研究报道了Ta对镍基高温合金凝固偏析、长时间热暴露组织及力学性能的影响^[14]。此外,Ta的加入还会影响镍基高温合金的凝固与均质化行为^[15],并可进入(Ti,Ta)C型碳化物,对其组成及结构特征产生影响^[16]。但是Ta对热处理过程中碳化物演变的影响研究较少,因此,以 $w[Ta]$ 分别为0和2.00%的Ni16Co10W8Cr5Al合金为研究对象,结合热力学计算、显微组织观察、碳化物面积与尺寸统计以及元素分析结果,研究了Ta对Ni16Co10W8Cr5Al合金均质化过程中核-壳碳化物结构以及粗化行为的影响。

1 试验材料与方法

试验所用的高温合金为Ni16Co10W8Cr5Al,通过控制冶炼过程中Ta的添加量,得到不同Ta含量的Ni16Co10W8Cr5Al合金,试验编号分别简称0Ta和2Ta合金,具体成分见表1。试验合金使用高纯原料在2 kg真空感应炉中进行制备,原料纯度>99.9%。装料后打开真空泵抽真空至5 Pa,当真空感应炉功率到达14 kW时通入氩气进行保护。当原料在坩埚中熔清后,保持30 min后浇铸,浇铸温度

约为1 400 ℃。

为避免取样位置对均质化试验结果造成影响,所有试验合金样品均从铸锭中部二分之一半径处取样,样品尺寸为4 mm×6 mm×8 mm。试验在HDX-14-14型高温箱式电阻炉(洛阳宏达炉业有限公司,额定温度1 400 ℃,炉膛尺寸500 mm×300 mm×300 mm)中进行,炉膛自然通风,气氛为空气。试验温度选取1 200 ℃,均质化时间为5、10 h,冷却方式为空冷。

均质化后的试样经过砂纸打磨至2000目并进行机械抛光后,观察组织和形貌。使用Olympus DSX510光学显微镜(OM)和配备了Oxford Ultim Max65能量色散光谱仪(EDS)的Thermo Scientific Apreo 2 C扫描电镜(SEM)表征均质化过程中的组织演化。利用Image-Pro plus 6.0软件测量碳化物MC的尺寸与面积占比,对每种试样至少统计8个视场的数据,取平均值。同时,使用Thermo-Calc软件进行相图计算,用于辅助分析1 200 ℃均质化过程中MC碳化物的稳定性及Ta在MC中的分配行为。

2 试验结果与分析

2.1 热力学计算结果

采用Thermo-Calc软件,结合镍基合金数据库TCNi9,获得不同温度下的平衡相含量如图1所示,由于研究重点为1 200 ℃下析出相变化,其中的液相以及基体 γ 相变化暂不给出。从图1中可以看出,在1 200 ℃下碳化物稳定存在,而Ta的加入并没有使MC碳化物在均质化温度下回溶甚至消失。恰恰相反,Ta的加入使得MC碳化物含量略有增加并提高了其完全溶解温度,从1 370 ℃提高至1 380 ℃,而 μ 相以及 γ' 相在1 200 ℃已无法稳定存在,在此不作讨论。

从图2中可以看到,随着 $w[Ta]$ 的增加,凝固温度区间扩大,这会加剧枝晶间的元素偏聚,同时会提高MC碳化物的平衡相分数和稳定范围。 $w[Ta]$ 过高则会促进 μ 相、R相等复杂的脆性相生成,将 $w[Ta]$ 控制为2.00%,并在1 200 ℃下进行热处理。

图3为0Ta与2Ta合金的MC碳化物成分,可以看到,MC碳化物中的主要元素为C、Ti、Nb、W,同

表1 试验合金的名义化学成分(质量分数)

Table 1 Nominal chemical composition of the experimental alloys

%

合金	C	Co	Cr	Mo	W	Al	Ti	Nb	Fe	Ta	Ni
0Ta	0.13	15.5	8.30	1.20	10.40	5.00	2.50	1.50	0.10	0.00	余量
2Ta	0.13	15.5	8.30	1.20	10.40	5.00	2.50	1.50	0.10	2.00	余量

时,2Ta合金的MC碳化物中 $w[\text{Ta}]$ 约为3.85%,这表明Ta在热力学平衡条件下具有向MC分配并富集的趋势,这与Ta是强碳化物形成元素的认识相一致^[13]。

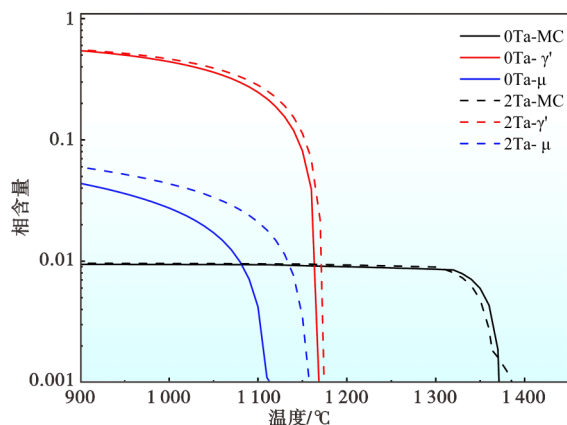


图1 0Ta和2Ta合金平衡相含量随温度的变化

Fig. 1 Equilibrium phase fractions of 0Ta and 2Ta alloys as a function of temperature

2.2 微观组织观察

0Ta与2Ta合金的金相组织如图4所示。从图4中可以看到,0Ta与2Ta合金中均可明显观察到MC碳化物,经过1200℃均质化处理后,碳化物仍大量存在,无明显回溶迹象,与图1计算结果相一致。图5为通过金相图片统计后的MC碳化物尺寸及面积占比与均质化时间的关系图。可以看到,铸态2Ta合金中的MC碳化物面积占比及尺寸均略大于0Ta。而随着均质化时间的延长,2Ta合金中的MC碳化物面积占比以及尺寸虽小幅增加但明显小于0Ta的增长幅度,说明Ta的加入改变了铸态MC碳化物的初始面积占比和尺寸,同时,增强了MC碳化物的稳定

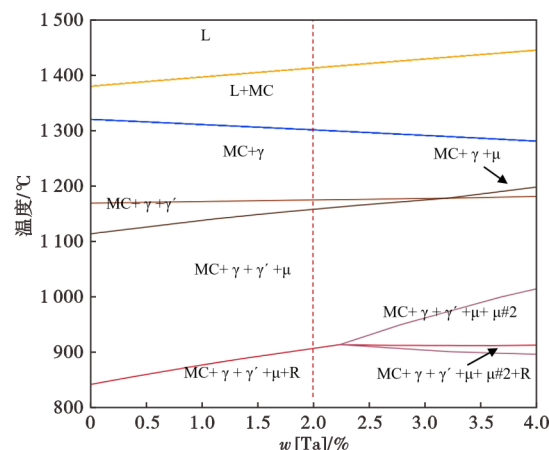


图2 Ta含量对Ni16Co10W8Cr5Al合金平衡相组成的影响
Fig. 2 Effect of Ta content on the equilibrium phase composition of Ni16Co10W8Cr5Al alloy

性,抑制了MC碳化物在均质化过程中的粗化行为。

2.3 MC碳化物元素分布及变化

图6为0Ta和2Ta合金中MC碳化物的SEM-BSE图像。可以看出,四种状态下均存在明亮的块状或不规则颗粒状碳化物,说明MC碳化物在铸态及均质化处理后均能稳定存在。部分碳化物内部呈现明显的暗色核心和亮色外壳特征,表现出典型核-壳结构。由于BSE图像衬度主要与局部平均原子序数有关,所以MC碳化物内部存在明显的成分分布不均。

图7中EDS面扫结果进一步表明,碳化物区域中Co、Cr、Ni等基体元素分布较少,而Ti、Nb、W、Mo等强碳化物形成元素明显富集,证明该类颗粒主要为多元MC型碳化物。而在2Ta合金中,Ta元素在碳化物区域明显富集,说明Ta参与了MC碳化物的

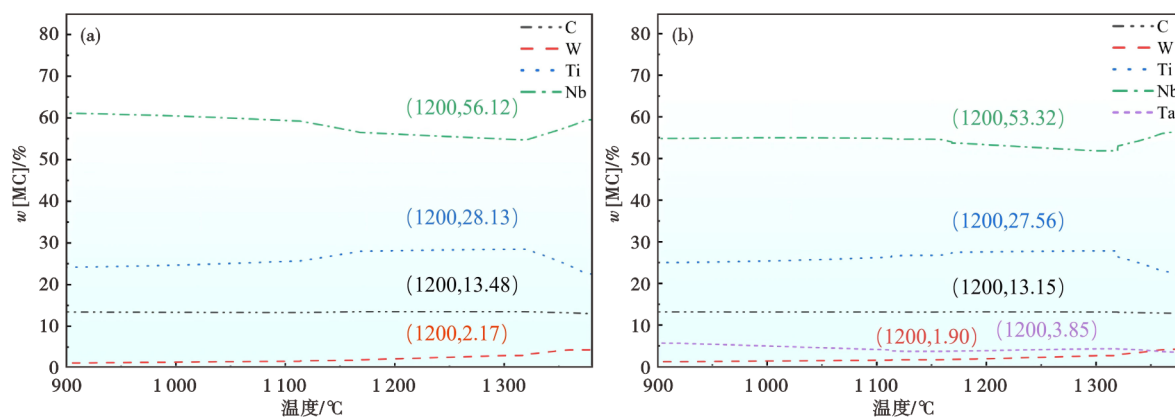


图3 0Ta和2Ta合金中MC相的平衡元素组成: (a) 0Ta合金, (b) 2Ta合金

Fig. 3 Equilibrium elemental composition of the MC phase in: (a) 0Ta alloy, (b) 2Ta alloy

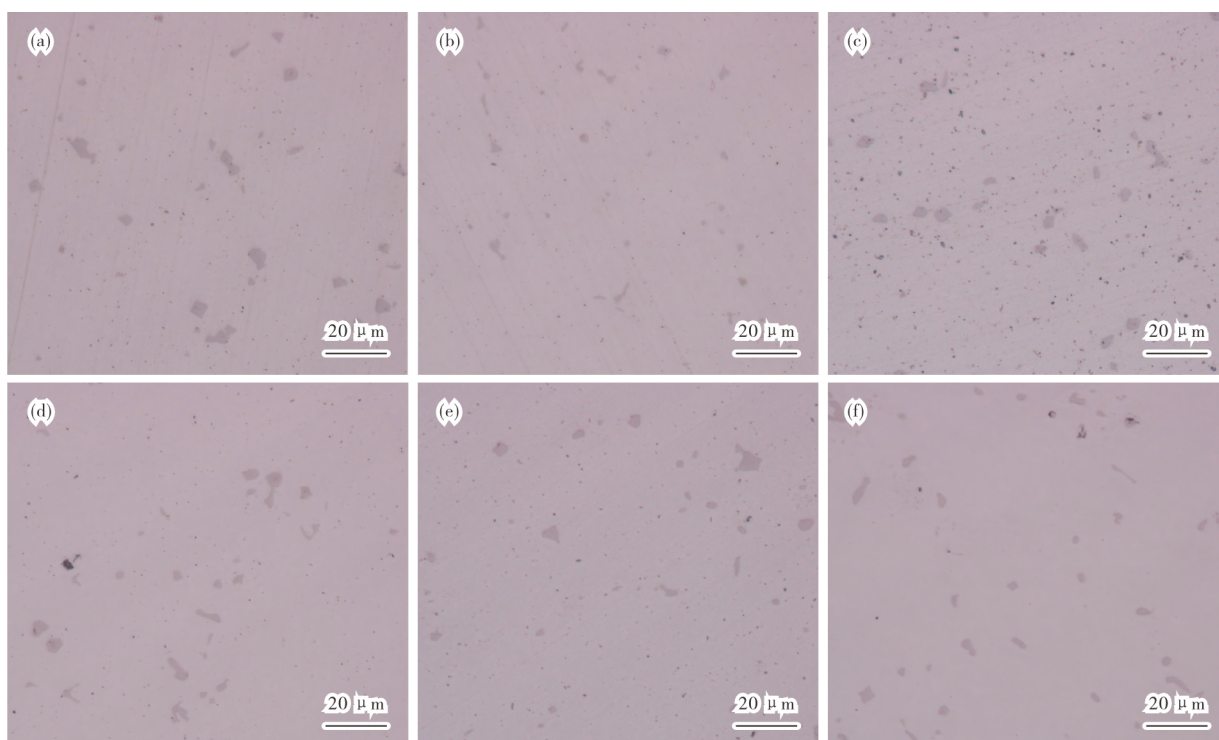


图4 0Ta和2Ta合金均质化前后MC碳化物的金相形貌: (a) 0Ta-铸态, (b) 0Ta-5 h, (c) 0Ta-10 h, (d) 2Ta-铸态, (e) 2Ta-5 h, (f) 2Ta-10 h

Fig. 4 Optical micrographs of MC carbides in 0Ta and 2Ta alloys before and after homogenization: (a) 0Ta-as-cast, (b) 0Ta-5 h, (c) 0Ta-10 h, (d) 2Ta-as-cast, (e) 2Ta-5 h, (f) 2Ta-10 h

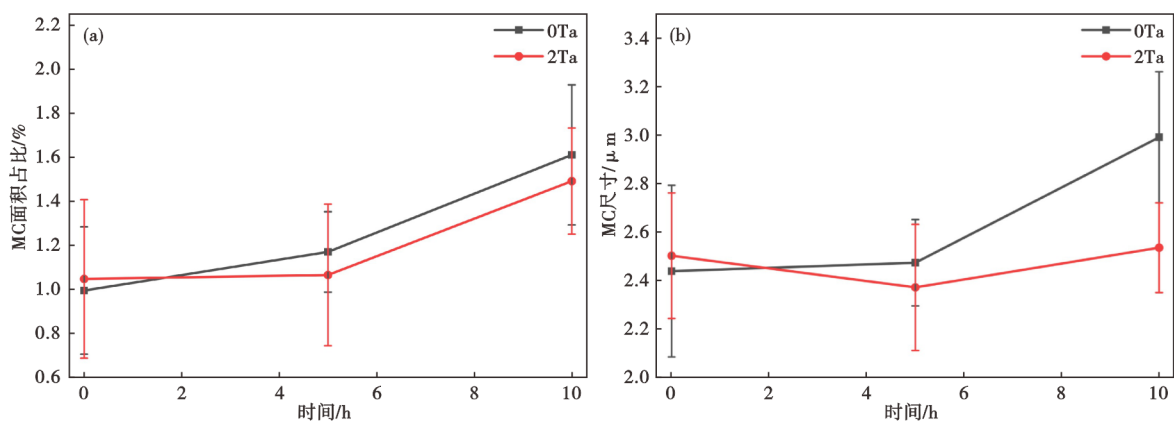


图5 均质化时间对0Ta和2Ta合金中MC碳化物面积占比和平均尺寸的影响: (a) 面积占比, (b) 平均尺寸统计结果

Fig. 5 Effect of homogenization time on MC carbides in 0Ta and 2Ta alloys: (a) area fraction, (b) average size

形成。由图7可以看到, C元素在碳化物区域整体连续分布, 核部和壳层均检测到C元素信号, 并未表现出完全分离的C富集与贫化区。因此, MC碳化物的核-壳结构与C元素的分布情况无明显关联, 主要原因是Ti、Nb、Ta、W、Mo等金属元素在MC颗粒核/壳区域中的分区。

表2、表3为MC碳化物核/壳EDS定量结果(化学成分的原子数分数), 进一步支持这一判断。0Ta铸态合金中碳化物核部 $y(\text{Ti})$ 约为54.1%, 壳

层 $y(\text{Ti})$ 约为30.3%, 说明核部明显富Ti; 同时, 壳层中 $y(\text{W})$ 、 $y(\text{Nb})$ 、 $y(\text{Mo})$ 均高于核部, 分别约为10.1%、4.4%和1.4%。经过1 200 °C热处理10 h后, 0Ta碳化物核部 $y(\text{Ti})$ 进一步升高至69.3%, 而壳层 $y(\text{Ti})$ 仍保持在约30.7%, 同时, 壳层中W、Nb、Mo仍相对较高。这说明0Ta合金中MC碳化物具有明显的富Ti核心和Nb、W、Mo共同富集的壳层结构。

2Ta合金中, Ta在核部和壳层均有明显分布。2Ta铸态合金中碳化物核部 $y(\text{Ta})$ 约为8.1%, 壳层

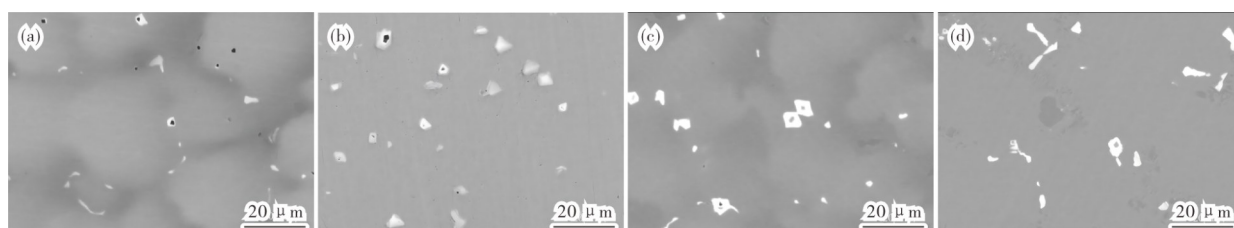


图6 0Ta和2Ta合金铸态及1 200 °C均质化10 h后MC碳化物的SEM-BSE形貌:(a) 0Ta-铸态,(b) 0Ta-10 h,(c) 2Ta-铸态,(d) 2Ta-10 h

Fig. 6 SEM-BSE images of MC carbides in 0Ta and 2Ta alloys in the as-cast state and after homogenization at 1 200 °C for 10 h: (a) 0Ta-as-cast, (b) 0Ta-10 h, (c) 2Ta-as-cast, (d) 2Ta-10 h

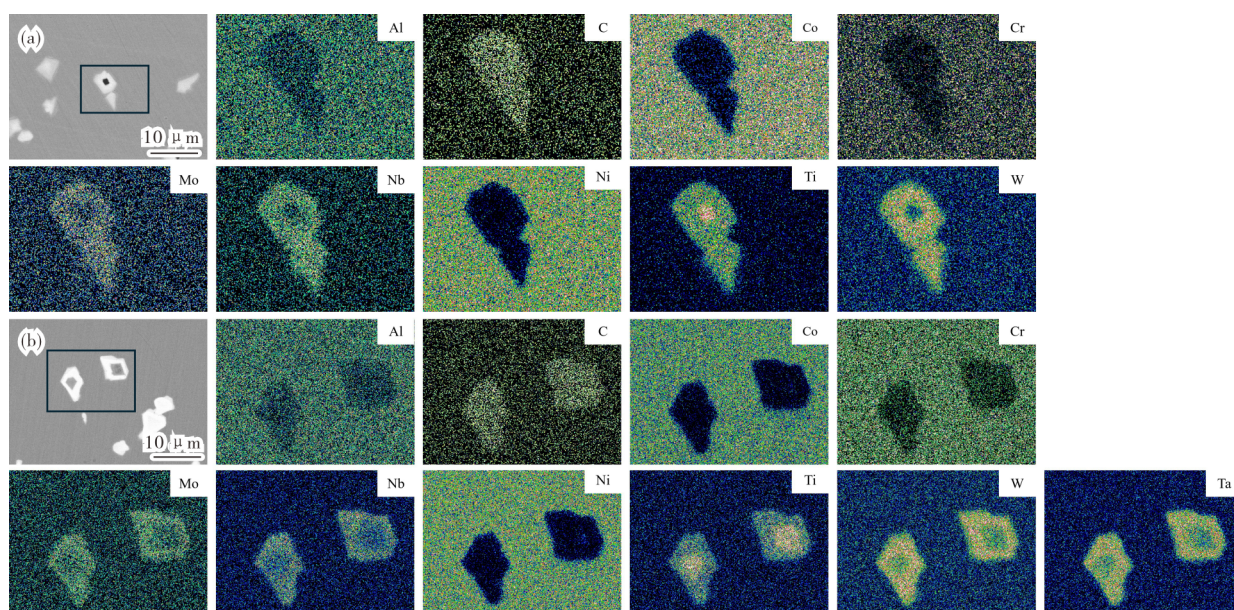


图7 0Ta和2Ta合金在1 200 °C均质化10 h后MC碳化物的EDS面扫描结果:(a) 0Ta-10 h,(b) 2Ta-10 h

Fig. 7 EDS elemental mapping of MC carbides in 0Ta and 2Ta alloys after homogenization at 1 200 °C for 10 h: (a) 0Ta-10 h, (b) 2Ta-10 h

表2 0Ta和2Ta合金铸态及1 200 °C均质化10 h后MC碳化物核部化学成分(原子数分数)

Table 2 Chemical composition of MC-carbide cores in 0Ta and 2Ta alloys in the as-cast state and after homogenization at 1 200 °C for 10 h

EDS结果(核)	0Ta 铸态	2Ta 铸态	0Ta 热处理 10 h	2Ta 热处理 10 h	%
C	21.4 ~ 24.8	38.2 ~ 41.8	10.4 ~ 23.2	38.1 ~ 43.9	
Ti	52.8 ~ 55.4	35.9 ~ 38.1	60.1 ~ 78.5	33.3 ~ 40.7	
Nb	2.9 ~ 3.5	6.9 ~ 7.3	2.4 ~ 2.8	6.4 ~ 7.0	
Mo	0.7 ~ 1.1	0.0 ~ 0.0	0.4 ~ 0.8	0.0 ~ 0.0	
W	8.0 ~ 8.8	4.2 ~ 4.2	5.3 ~ 8.7	3.7 ~ 4.1	
Ta	0.0 ~ 0.0	7.7 ~ 8.5	0.0 ~ 0.0	7.2 ~ 7.8	

γ (Ta)约为8.4%;热处理10 h后,核部 γ (Ta)约为7.5%,壳层 γ (Ta)约为8.5%。这说明Ta在MC颗粒核/壳区域均明显富集,且在热处理前后保持较稳定的含量。与0Ta相比,2Ta碳化物核部中 γ (Ti)明显降低,铸态和热处理后均为37.0%,远低于0Ta核部的54.1%和69.3%。与此同时,2Ta核部和壳层中

Nb、Ta含量均较高,说明Ta的加入改变了MC颗粒中金属元素的分配情况,使其呈现Ti-Nb-Ta多元素富集特征。虽然,核/壳EDS定量结果中,壳层 γ (C)高于核部。例如,0Ta铸态核部 γ (C)为23.1%,壳层 γ (C)约为47.1%;2Ta铸态核部 γ (C)为40.0%,壳层 γ (C)为53.6%。但是,由于EDS对轻元素C的定

表3 0Ta和2Ta合金铸态及1 200 °C均质化10 h后MC碳化物壳部化学成分(原子数分数)

Table 3 Chemical composition of MC-carbide shells in 0Ta and 2Ta alloys in the as-cast state and after homogenization at 1 200 °C for 10 h

EDS结果(壳)	0Ta铸态	2Ta铸态	0Ta热处理10 h	2Ta热处理10 h
C	44.1 ~ 50.1	51.6 ~ 55.6	39.1 ~ 59.1	53.4 ~ 56.4
Ti	24.8 ~ 35.8	16.5 ~ 22.3	19.6 ~ 41.8	15.4 ~ 20.0
Nb	3.7 ~ 5.1	7.6 ~ 9.0	4.0 ~ 5.4	8.3 ~ 12.5
Mo	1.0 ~ 1.8	0.2 ~ 0.6	1.1 ~ 1.7	0.1 ~ 0.5
W	9.2 ~ 11.0	5.0 ~ 5.6	9.0 ~ 10.8	2.8 ~ 5.4
Ta	0.0 ~ 0.0	8.1 ~ 8.7	0.0 ~ 0.0	7.7 ~ 9.3

量分析误差较大,且核部可能受到孔洞、表面状态及相互作用体积影响,因此,不根据C元素的绝对含量差异判断核-壳结构的形成机制。相比之下,Ti、Nb、Ta、W、Mo等金属元素的分布规律更加稳定和可信。MC碳化物核-壳结构主要表现为金属元素分布差异。

综上所述,0Ta合金中的MC碳化物主要表现为富Ti核心和Nb、W、Mo相对富集的壳层;热处理后核部Ti进一步富集,说明0Ta中MC碳化物在均质化过程中发生了明显的元素再分配现象。2Ta合金中,Ta在MC碳化物区域明显富集,并改变了Ti、Nb、W、Mo等元素的分配情况,同时,热处理前后核/壳成分变化相对较小。因此,Ta的主要作用为调控MC碳化物中的金属元素分配并提高其成分稳定性,从而抑制均质化过程中的元素再分配以及碳化物的粗化行为。

2.4 分析与讨论

综合热力学计算与组织统计可知,Ta对MC碳化物的作用主要表现为提高稳定性,并减缓均质化过程中的粗化。图1-3显示,加入Ta后MC碳化物的平衡相分数和稳定温度区间扩大,完全溶解温度由约1 370 °C升至1 380 °C,且Ta具有参与MC碳化物形成的倾向。从统计结果看,1 200 °C均质化后两种合金中MC碳化物均未明显回溶,且面积占比及平均尺寸均增大,但2Ta合金增幅明显小于0Ta合金,说明Ta可减缓MC碳化物粗化。

核/壳EDS检测结果进一步表明,Ta会影响MC碳化物内部金属元素的再分配。0Ta合金MC碳化

物核心明显富Ti,热处理后核心Ti进一步升高,而壳层仍相对富集Nb、W、Mo,说明发生了较明显的元素再分配。2Ta合金中 γ (Ta)在核部和壳层均保持约8%,主要金属元素含量在热处理前后变化较小,试验表明,Ta参与MC碳化物的形成并提高其成分稳定性^[13,16]。因此,Ta的主要作用为提高MC碳化物的成分稳定性、减缓元素再分配与粗化,而并非抑制MC碳化物形成。但是一次MC碳化物的组成受凝固过程和微量元素分配影响^[17],EDS检测结果只能证明Ta在MC碳化物区域富集,尚不足以确定其晶格占比或判定形成独立TaC,Ta的具体晶格占比仍需TEM/SAED等进一步验证。

3 结论

1) Ni16Co10W8Cr5Al合金中MC碳化物在1 200 °C均质化过程中仍为稳定相。均质化后碳化物面积占比增加,说明该温度下MC碳化物主要发生长大、粗化和元素再分配,而非完全溶解。

2)EDS面扫描结果显示,MC碳化物核部和壳层均存在明显C信号;结合BSE衬度及金属元素分布可知,核-壳结构的成分差异主要表现为Ti、Nb、Ta、W和Mo等金属元素的重新分配。

3)0Ta合金中MC碳化物主要表现为富Ti核心和Nb、W、Mo参与的复合MC壳层。1 200 °C均质化过程中,0Ta合金中MC碳化物发生明显粗化,平均尺寸增长较大。而当 w [Ta]为2%时,Ta在MC颗粒区域明显富集并改变金属元素比例,使MC颗粒呈现Ti-Nb-Ta多元素富集特征,提高了MC碳化物成分稳定性,抑制了均质化过程中MC碳化物的粗化行为。

参考文献

- [1] 张 瑞, 刘 鹏, 崔传勇, 等. 国内航空发动机涡轮盘用铸锻难变形高温合金热加工研究现状与展望[J]. 金属学报, 2021, 57(10): 1215-1228.
- [2] 杨 浩, 王方军, 李 采, 等. 镍基高温合金的熔炼工艺研究

进展[J]. 特殊钢, 2023, 44(3): 1-9.

- [3] Peng P, Liu Z J, Xu Y L, et al. Effect of Ta on solidification characteristics and mechanical properties of DZ411 Ni-based superalloy [J]. China Foundry, 2023, 20(5): 376-386.

- [4] 张 勇, 李鑫旭, 韦 康, 等. 850 °C 涡轮盘用新型变形高温合金 GH4975 挤压棒材热变形规律研究[J]. 金属学报, 2020, 56(10): 1401-1410.
- [5] Li Y S, Dong Y W, Jiang Z H, et al. Hot deformation characteristics of GH4975 nickel-based superalloy in the coexistence region of γ and γ' phases[J]. JOM, 2024, 76(9): 5133-5148.
- [6] Wang Y L, Tan Y, Zhang Y, et al. Hot deformation behavior and dynamic recrystallization mechanisms of GH4975 alloy prepared by electron beam smelting layered solidification[J]. Materials Characterization, 2023, 202: 113034.
- [7] 李成龙, 钟裕国, 李 晴, 等. 自由锻工艺及碳含量对高温合金 GH3128 显微组织与力学性能影响[J]. 特殊钢, 2023, 44(3): 90-93.
- [8] Jiang H, Xiang X M, Dong J X. The morphology and characteristics evolution of MC carbide during homogenization in hard-to-deform superalloy GH4975 [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 929: 167086.
- [9] 穆 岩, 王树森, 仇凤江, 等. 长期时效对高钨镍基高温合金碳化物演变的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(9): 1148-1152.
- [10] 向雪梅, 江 河, 董建新, 等. 难变形高温合金 GH4975 的铸态组织及均匀化[J]. 金属学报, 2020, 56(7): 988-996.
- [11] 高首磊, 徐晓卫, 张 宏, 等. 高温均匀化对 GH4710 镍基合金组织及性能的影响[J]. 特殊钢, 2024, 45(1): 87-93.
- [12] Zhao G D, Zang X M, Sun Y X, et al. Effect of homogenization treatment on the microstructure evolution and hot deformation behavior of hard-deformed superalloy GH4975 [J]. Materials Science and Engineering: A, 2025, 942: 148711.
- [13] Gao X Y, Zhang L F. Effect of Ta addition on primary MC carbide in Ti-Nb-Mo-W-alloyed superalloy [J]. Materials Characterization, 2024, 211: 113918.
- [14] 刘 静, 张思倩, 王 栋, 等. Ta 对一种抗热腐蚀镍基单晶高温合金长时热暴露组织和蠕变性能的影响[J]. 金属学报, 2024, 60(2): 179-188.
- [15] Zhang W Y, Li L H, Su H Y, et al. Effects of Ta addition on the solidification and homogenization of Ni-based superalloy GH4065A [J]. Materials, 2026, 19(5): 1002.
- [16] Jin X, Zhao Y S, Chen W, et al. Microstructural characterization of defects and secondary phases in (Ti, Ta)C-type carbides in nickel-based superalloys [J]. Materials, 2026, 19(9): 1875.
- [17] 王志刚, 文嘉利, 杨贵新, 等. GH2907 合金 VIM+VAR 3 t 钢锭 1 190 °C 均质化过程中 Nb 和 Si 的扩散行为[J]. 特殊钢, 2021, 42(4): 17-19.