

新型 Ni-Co 基高温合金中平衡析出相的热力学研究 *

王 衣 孙 锋 董显平 张澜庭 单爱党

(上海交通大学材料科学与工程学院, 上海 200240)

摘 要 利用热力学计算软件 JMatPro 和相应的镍基高温合金数据库, 研究了 U720Li 合金以及在此基础上研发的新型 Ni-Co 基高温合金的化学成分对平衡相的析出行为、加工性能和 γ/γ' 晶格错配度的影响. 结果表明: Ti/Al 值 (原子比) 的增加提高了合金中 γ/γ' 相的晶格错配度, γ' 析出相的含量随 Ti+Al 含量 (原子分数) 的增加而增加. 因此, 增加 Ti/Al 值和 Ti+Al 含量能提高合金的高温强度. Co 含量的升高可以拓宽合金的加工窗口, 改善合金的加工能力, 并且还可以增加合金 γ/γ' 相的晶格错配度, 提高合金错配强化的效果. 同时, Ti/Al 值的增加促进合金中 η 相析出, 而 Co 含量的增加具有抑制 η 相的效果. 因此, 在 Co 含量较高的 Ni-Co 基高温合金中, 适当提高 Ti 含量, 增加 Ti/Al 值对提高合金高温强度有利.

关键词 Ni-Co 基高温合金, 热力学计算, 析出相, 错配度

中图法分类号 TG133

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2010)03-0334-06

THERMODYNAMIC STUDY ON EQUILIBRIUM PRECIPITATION PHASES IN A NOVEL Ni-Co BASE SUPERALLOY

WANG Yi, SUN Feng, DONG Xianping, ZHANG Lanting, SHAN Aidang

School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240

Correspondent: Zhang Lanting, professor, Tel: (021)54747471, E-mail: lantingzh@sjtu.edu.cn

Supported by Major Program for the Fundamental Research of Science and Technology Committee of the Shanghai Municipality (No.08dj1400402) and Innovation Program of Shanghai Municipal Education Committee (No.09ZZ16)

Manuscript received 2009-07-27, in revised form 2009-11-20

ABSTRACT Thermodynamic properties of the traditional U720Li alloy and the new Ni-Co base superalloy have been studied using JMatPro and the latest relevant database for Ni base superalloys. The effects of chemical composition on the equilibrium precipitation phases, process-ability and γ/γ' mismatch have been analyzed. It is found that the γ/γ' mismatch increases with the increase of Ti/Al (atomic ratio). The volume fraction of γ' is proportional to the Ti+Al contents (atomic fraction). Therefore, by increasing the Ti/Al ratio and Ti+Al content, the yield strength of alloys can be improved. On the other hand, the γ' solvus temperature decreases by Co additions. As a result, the range of processing temperature is extended. The γ/γ' mismatch also increases with Co additions, which adds additional strengthening to the alloy. Moreover, high Ti/Al ratio or low Co content promotes the precipitation of η phase. Thus, Ni-Co base superalloys with high Ti+Al content, Ti/Al ratio and Co content bear an improved strength, phase stabilities and process-ability.

KEY WORDS Ni-Co base superalloy, thermodynamic calculation, precipitation phase, mismatch

镍基高温合金中, 难熔元素 Mo, W 等的加入在提

高合金固溶强化效果的同时也会产生一些负面的影响 [1]. 首先, 合金中难熔元素过多会促使合金在高温下析出一些有害相, 如拓扑密排 (TCP) 相和几何密排 (GCP) 相, 这些有害相通常富集一些具有固溶强化效果的难熔元素, 因此这些相的析出会降低合金的固溶强化效果. 同时, 这些有害相都是一些脆性相, 材料服役过程中容易在这些析出相上形成裂纹源, 从而降低合金高温力学性能 [2]. 其次, 过多的难熔合金元素会加重合金中的偏析, 降低合金的加

* 上海市科委基础研究重大项目 08dj1400402 和上海市教委创新项目 09ZZ16 资助

收到初稿日期: 2009-07-27, 收到修改稿日期: 2009-11-20

作者简介: 王 衣, 女, 1985 年生, 硕士生

DOI:10.3724/SP.J.1037.2009.00515

工性能, 减小合金的加工窗口, 因此这类合金必须使用粉末冶金的方法进行制备, 增加了合金的制备难度和生产成本^[3]. 所以, 研究者希望在不增加合金中难熔元素含量的前提下, 通过调整合金中 Al, Ti, Co 等主元素含量, 在保持强化相适当的体积分数的同时, 提高材料高温服役过程中的组织稳定性, 避免一些有害相的析出, 并且确保合金具有一定的加工变形窗口^[4].

Gu 等^[5] 在镍基变形高温合金 U720Li(使用温度范围为 600—760 °C) 的基础上, 提出了利用 Co_3Ti 进行增强的思路, 研制出一种新型 Ni-Co 基变形高温合金——TMW 合金, 该合金具有较高的使用温度 (比 U720Li 合金的使用温度提高 50 °C 以上) 和优良的加工性能, 但是合金中主要元素 Al, Ti 和 Co 含量的变化对合金平衡析出相和加工性能等方面的影响还没有系统性研究. 郭建亭^[6] 报道了 Ti 和 Al 元素对于一种 35Ni-15Cr 型铁基高温合金中 γ/γ' 相的错配度有一定影响, Ti/Al 原子比值的增加可以提高 γ' 相的点阵常数, 而 γ 相的点阵常数则随 Ti/Al 原子比值的增加而减小, 随 Ti+Al 含量 (原子分数, 下同) 的增加而增加. 同时还有一些研究者^[7-9] 利用热力学计算的方法分析了 W, Mo, C, Al, Ti, Cr 等元素对于 Waspaloy, GH586 和 GH648 等合金平衡析出相的影响. JMatPro 是一种比较成熟的热力学计算软件, 利用一些相似合金的实验数据, 通过一些热力学公式和统计模型, 计算合金平衡态下的物理性能、相含量等. 研究结果^[10-13] 表明: 通过热力学计算软件 JMatPro 可以比较准确地计算出不同成分的镍基高温合金的平衡相含量和物理性能. 本文利用 JMatPro 软件进行热力学计算, 分析了具有较高 Co 和 Ti 含量的 TMW 合金中, Co, Al 和 Ti 元素含量的变化对合金可能的析出相、加工窗口和 γ/γ' 晶格错配度的影响, 总结了这 3 种元素含量的变化对提高合金第二相强化效果和高温组织稳定性的作用, 为此类镍基变形高温合金的成分优化设计提供参考.

1 实验方法

Ti+Al 含量的变化会改变合金中强化相 γ' 的体积分数, 从而影响合金的高温强度. 同时又有研究^[14] 发现, 在 IN718 等镍基高温合金中, Ti/Al 值会影响材料中的一些有害相如 η 相的析出, 因此本研究系统地选用了不同 Ti/Al 值和 Ti+Al 含量 (图 1), 在不改变合金中其它合金元素 (Co, Mo, W, B, C 和 Zr) 含量的条件下 (Ni 为余量), 利用 JMatPro 软件研究了在合金使用温度下, Ti 和 Al 含量的变化对合金平衡相的析出行为以及 γ/γ' 相晶格错配度的影响. 而后改变 Co 含量和 Ti/Al 值, 保持合金中 Ti+Al 含量和其它元素的含量不变 (Ni 取余量), 研究 Co 含量的变化对有害相析出情况的影响. 最后, 改变合金中的 Co 含量, 保持合金中其它元素含量不变 (Ni 取余量), 分析 Co 含量对合金加工性能和 γ/γ' 相错配度

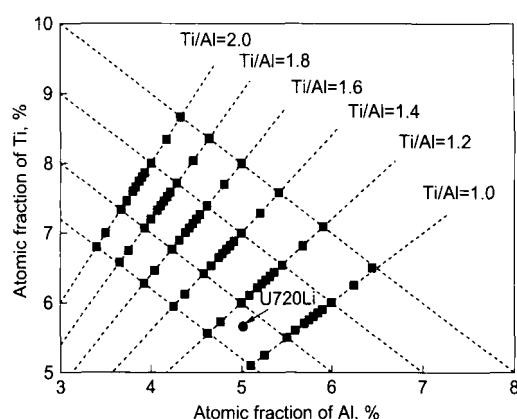


图 1 热力学计算 Ni-Co 基合金中的 Ti 和 Al 含量取值

Fig.1 Ti/Al atomic ratio map in the Ni-Co base superalloys TMW for thermodynamic calculation

的影响. 在计算合金错配度时, 取 U720Li 合金的最终热处理温度为合金的热处理温度.

2 结果与讨论

2.1 U720Li 合金的热力学平衡相

典型 U720Li 合金的化学成分 (原子分数, %) 为 Al 5.0, Ti 5.7, Co 14.2, Cr 17.7, Mo 1.8, W 0.4, C 0.14, B 0.10, Zr 0.02, Ni 余量^[5]. 经过热力学计算得到的各主要析出相与析出温度的关系如图 2 所示. 合金的主要析出相为 γ' 相, γ' 相的摩尔分数随温度的升高而降低, 当温度达到 1146 °C 时, γ' 相完全固溶. 在目标使用温度范围 (600—760 °C) 内, 合金中有 μ 相和 σ 相析出, 在 675 °C 以上 μ 相不析出. 由于热力学计算结果均为稳定的平衡相, 因此 μ 相和 σ 相可能会在合金长期使用后才能逐步析出. 在 760 °C 时, U720Li 合金中各主要析出相的化学成分见表 1. 基体 γ 相主要富集 Co, Cr 等元素, 而强化

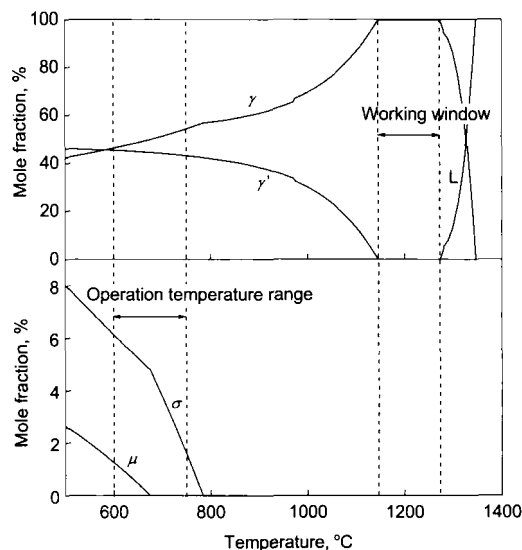


图 2 U720Li 合金各析出相与析出温度的计算曲线

Fig.2 Calculated dependences of precipitation phases on precipitation temperature and its partial magnification

表 1 760 ℃下 U720Li 合金中析出相的平衡成分
Table 1 Calculated chemical compositions of equilibrium precipitation phases in U720Li alloy at 760 ℃

Phase	(atomic fraction, %)						
	Ni	Co	Al	Ti	Cr	Mo	W
γ	46.10	19.61	1.07	0.317	29.12	2.87	0.52
γ′	67.83	6.84	10.28	12.69	1.83	0.12	0.25
σ	16.12	22.10	0	0	50.26	11.19	0.23

相 γ' 主要富集 Al, Ti 等元素, σ 相主要富集固溶强化元素 Cr 和 Mo. 热力学计算结果表明, U720Li 合金的固相线温度为 1270 ℃, 因此合金的加工窗口为 124 ℃ (图 2).

2.2 Ti 和 Al 含量的影响

2.2.1 Ti 和 Al 含量对 TMW 合金平衡析出相的影响 图 3 表明了 在 760 ℃下, 不同 Ti 和 Al 含量 (图 1) 的 TMW 合金中的平衡析出相. TMW 合金的主要析出相包括 γ' , σ 和 η 相. 在 Ti+Al 含量大于 10.2% 时, 合金中有 σ 相析出, 当 Ti/Al 值大于 1.6 时, 合金中会产生 η 相, η 相是富集 Ti 元素的 Ni_3Ti [15], 这一计算结果与实验中发现的高 Ti 低 Al 的 TMW 合金容易形成 η 相的情况一致 [16]. 在 760 ℃时, 合金中不析出 μ 相. σ 相的形成会降低基体和强化相中固溶强化元素的含量, 而 η 相的析出会在材料中形成孔洞, 促使合金在服役过程中萌生裂纹, 降低材料的高温力学性能和组织稳定性 [2], 因此在合金成分的设计中应避免这些有害相的形成.

选择 Ti/Al 值分别为 1.1, 1.4 和 1.6 的 3 种 TMW 合金 (Ti+Al 含量为 11.5%, 其它合金元素含量与 U720Li 相同), 合金采用真空感应熔炼和轧制变形 (变形量为 75%), 然后进行热处理, 热处理工艺为: 1120 ℃/4 h, 空冷 +760 ℃/24 h, 空冷. 扫描电子显微镜 (SEM) 样品用腐蚀剂 (10 g CuSO_4 +50 mL H_2O +50 mL HCl) 腐蚀. 微观组织观察发现, Ti/Al 值为 1.1 和 1.4 的 2 种样品中只有基体和 γ' 析出相 (图 4a), 而在 Ti/Al 值为 1.6 的样品中还出现了较多的棒状析出相 (图 4b). 能谱分析表明, Ti 元素在此类棒状析出相中富集, 并且析出相中的 Ni 和 Ti 元素的原子比接近 3 : 1 (Ni 58.0, Ti 16.6), 确定为 $\eta\text{-Ni}_3\text{Ti}$ 相. 因此提高 Ti/Al 值会增加 η 相的析出倾向. 当 Ti/Al 值达到 1.6 左右时, η 相开始析出. 此实验结果与计算结果基本一致.

2.2.2 Ti 和 Al 含量对 TMW 合金晶格错配度的影响 图 5 表明了 在 760 ℃下, 不同 Ti 和 Al 含量对合金中强化相 γ' 相的体积分数以及合金中 γ/γ' 相晶格错配度的影响. Ti+Al 含量为 11.6% 时, γ' 相的体积分数和晶格错配度随 Ti/Al 变化的曲线均在 Ti/Al 值约为 1.6 处出现拐点 (图 5a), 这是由于合金在此处形成了 η 相. 在 Ti/Al 值小于 1.6 时, Ti/Al 值的改变对合金中

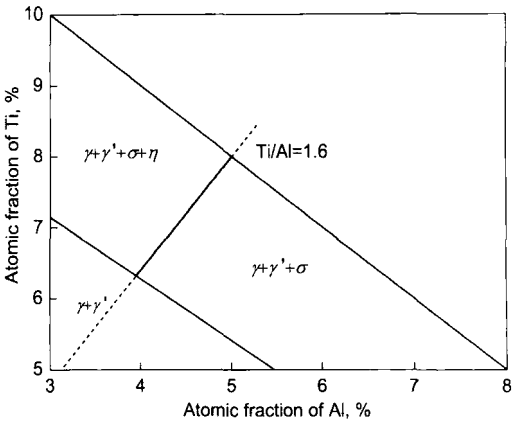


图 3 760 ℃时 TMW 合金中平衡相随 Al 和 Ti 含量变化关系
Fig.3 Changes of stable phase with Al and Ti contents in TMW alloy (14.2Co+17.7Cr+0.4W+1.8Mo+0.1B+0.14C+ 0.02Zr+xAl+yTi+Ni) at 760 ℃

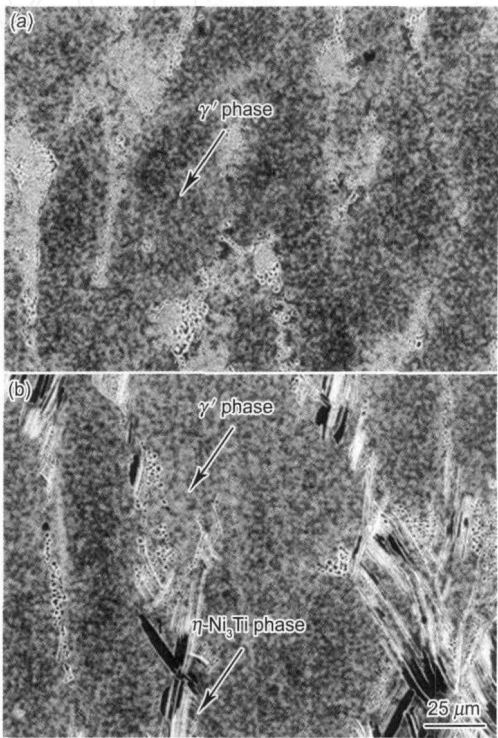


图 4 TMW 合金的显微组织
Fig.4 Microstructures of TMW alloys
(a) SEM observation, Ti/Al=1.4, γ' phase precipitated only
(b) SEM observation, Ti/Al=1.6, η phase appeared

γ' 相的体积分数没有明显影响, 而当 Ti/Al 值大于 1.6 时, 随着 Ti/Al 值的升高, γ' 相的体积分数明显下降, 这主要是因为基体中 Ti 元素在新形成的 η 相中富集, 造成基体中 γ' 相形成元素 Ti 和 Al 的总含量下降所致.

当 Ti/Al 值等于 1.6 时, γ' 相的体积分数和晶格错配度随 Ti+Al 含量变化的曲线上无拐点出现 (图 5b), 在此范围内没有其它相析出. 随着 Ti+Al 含量的提高, γ' 相的形成元素含量不断增加. 因此, γ' 相的体积分数明显提高.

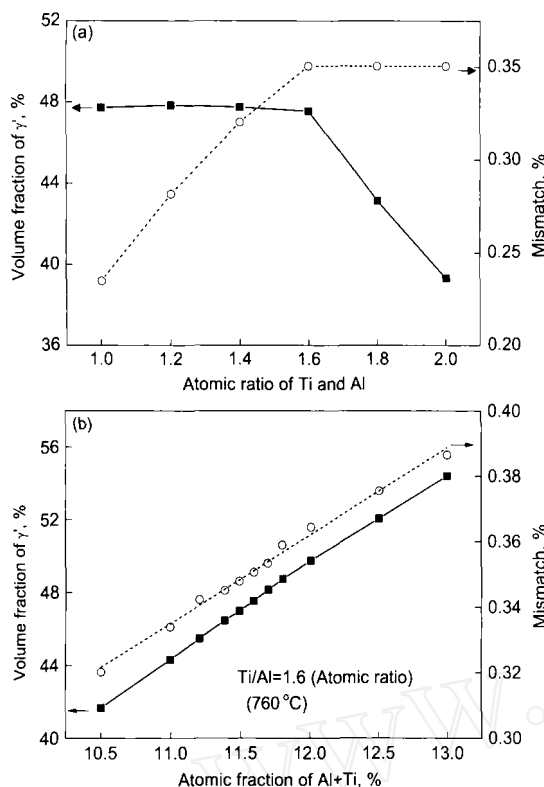


图5 760 °C下TMW合金中 γ' 平衡相体积分数和 γ/γ' 晶格错配度随Al, Ti含量变化关系

Fig.5 Volume fraction of γ' and γ/γ' mismatch as a function of Al and Ti content in TMW alloys at 760 °C
(a) as a function of Ti/Al ratio (Ti+Al=11.6%)
(b) as a function of Ti+Al (Ti/Al=1.6)

利用JMatPro计算合金760 °C下的晶格常数, 根据 $\delta = \frac{2(a_{\gamma'} - a_{\gamma})}{a_{\gamma'} + a_{\gamma}} \times 100\%$ (其中, δ 为 γ/γ' 相的晶格错配度, a_{γ} 和 $a_{\gamma'}$ 分别为 γ 和 γ' 相的晶格常数) 计算合金 γ/γ' 相的晶格错配度. 计算结果表明, 在760 °C下, Ti+Al含量为11.6%时(图5a), 当Ti/Al值小于1.6, 合金中 γ/γ' 相晶格错配度随着Ti/Al值的升高而增大, 当Ti/Al值大于1.6时, 错配度基本保持不变. γ/γ' 相的错配度与 γ' 相中的Ti含量有关^[12]. 在Ti/Al值小于1.6时, 随着Ti/Al值的增大, γ' 相中的Ti含量升高, γ' 相的点阵常数增大, 而基体 γ 相的点阵常数基本不变, 因此晶格错配度上升. 而当Ti/Al值达到1.6时, γ' 相中的Ti含量饱和, 进一步升高Ti/Al值, 导致 η 相析出, 但 γ' 相中的Ti含量不再发生变化, 因此, 此时两相间的错配度基本保持不变. 在Ti/Al值为1.6时(图5b), 晶格错配度随着Ti+Al含量的增加而增大, 这主要因为Ti+Al含量的提高, 增加了合金中 γ' 相的体积分数, 而 γ' 相中Ti, Al等元素的含量基本不变, 因此合金中 γ' 相的点阵常数保持不变. 但随着合金中Ti+Al含量的增加, γ 相的点阵常数逐渐减小, 因此 γ/γ' 相的错配度有所提高.

用X射线衍射(XRD)方法测定TMW合金中 γ/γ' 相的晶格错配度, 对Ti/Al值等于1.6, Ti+Al含量等于11.7的样品, 其晶格错配度为0.302%, 比JMatPro的计

算值(0.34%)略微偏小, 这可能是因为热力学计算均为平衡态, 而在实际样品中的各组成相是非平衡态, 基体中的合金元素没有充分扩散, γ' 相中Ti和Al含量较低, 因此实验所测的错配度偏低.

为了提高高温合金的使用温度, 合金必须同时具备较高的组织稳定性和第二相强化效果, 因此合金成分设计的目标是在具有一定 γ' 强化相体积分数的同时, 防止合金高温服役时析出有害相. 而合金中 γ/γ' 相的错配度也会影响合金的高温力学性能, 提高错配度可以增加 γ/γ' 相共格界面处的晶格畸变, 从而提高合金高温下的屈服强度. 但是过高的错配度会降低高温下共格界面的稳定性. 研究^[15]发现, 对于使用温度为 $0.6T_m$ (T_m 为熔点) 以下的合金, 如GH2706, GH4169, Inconel718等, 共格应变强化对合金性能有重要作用, 这些合金的点阵错配度可以达到0.5%左右, 而对于一些使用温度在 $0.6T_m$ 以上的合金, 如果合金错配度太大, 在高温下 γ' 相将不稳定, 容易聚集长大, 使弹性应力松弛, 并且影响合金的持久时间和蠕变性能. 对于U720Li合金, 计算的 γ/γ' 的错配度为0.243%. 因此, 不同Ti和Al含量下合金平衡析出相和晶格错配度的计算结果表明, 在TMW合金成分设计中, 控制Ti/Al值为1.6可以获得较高的强化相体积分数和晶格错配度, 同时抑制有害相 η 相的形成, 合金可能具有较高的屈服强度.

2.3 Co含量的影响

保持TMW合金中Ti+Al含量为11.6, 计算在760 °C下, 不同Ti/Al值的合金中, Co含量(质量分数, 下同)的变化对析出相的影响. 可以发现, 当Co含量为14.8%时, Ti/Al值为1.6时即有 η 相析出, 而当Co含量达到30%时, η 相在Ti/Al值为1.75处方能析出. 图6所示为760 °C下, Ti+Al含量为11.6%时, Co含量的变化对TCP相析出行为的影响. 可见, 随着Co含量的升高, 合金中的 η 相含量不断下降, 因此, Co含量的提高可以抑制合金中 η 相的析出. 但是, Co含量的上升加剧了合金中 σ 相的析出. 所以, 在增加合金中的Co含量时, 可以略微提高合金的Ti/Al值, 但是必须控制合金中Cr, Mo等 σ 相形成元素的含量, 以避免 σ 相的析出.

由图7a可见, 对于Ti/Al值为1.6, Ti+Al含量为11.6的TMW合金, 在Co含量在18%—30%之间时, 随着合金中Co含量的升高, γ' 相的完全固溶温度下降, 合金的加工窗口(从 γ' 相完全固溶到合金固相线之间的温度区间)明显扩大, 从65 °C提高到87 °C, 有利于合金的变形加工. 同时, Co含量的增加会提高平衡态下 γ/γ' 相的错配度. 实验中选择4种Co含量不同的Ni-Co基合金, 利用XRD测定室温下合金中 γ 和 γ' 相的晶格常数, 计算合金的错配度. 由于相对于Ti/Al值和Ti+Al含量的变化, Co含量的变化对合金 γ/γ' 相的错配度的影

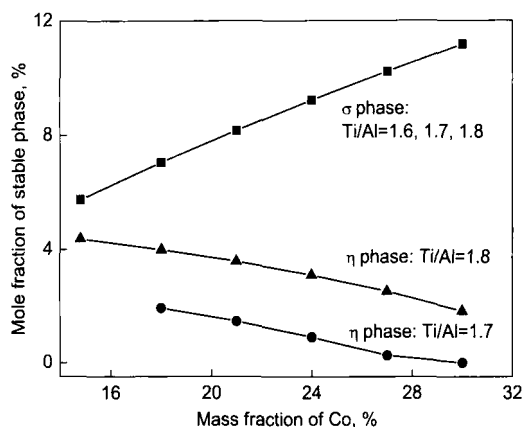


图 6 760 °C 下, 不同 Ti/Al 值的 TMW 合金中平衡相摩尔分数随 Co 含量的变化

Fig.6 Mole fraction of stable phases in TMW alloys with (Ti+Al) content 11.6% and different Ti/Al ratios as a function of Co content at 760 °C

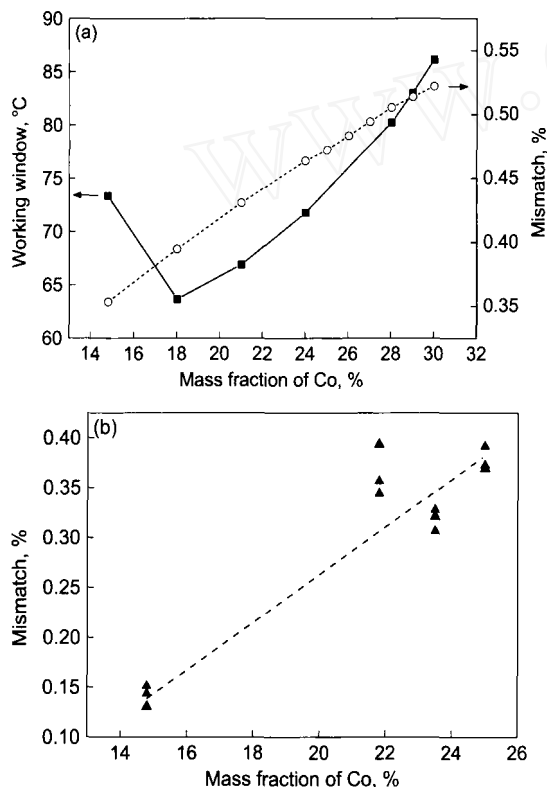


图 7 TMW 合金加工窗口和 γ/γ' 晶格错配度随 Co 含量变化关系

Fig.7 The working window (the range from γ' solvus temperature to solidus temperature of alloys) and γ/γ' mismatch as a function of Co content in TWM alloy (a) calculated result by JMatPro (b) experimental results by XRD

响更为明显, 因此考虑 Co 含量的影响可以发现, Co 含量从 14.7% 提高至 25% 时 (图 7b), 合金的晶格错配度明显增加, 此变化趋势与计算结果基本一致。但实验结果比 JMatPro 的计算值略微偏小, 这可能是因为热力学计算均为平衡态所致。根据计算和实验结果可以得知, 提高 Co 含量可以增加合金的晶格错配度, 从而增加析出强化

效果, 但是过高的 Co 含量可能导致高温下 γ/γ' 相共格界面的失稳。

3 结论

(1) 760 °C 时 TMW 合金的主要平衡析出相为 γ' , σ 和 η 相。Ti/Al 值过高时, 合金中会有 η 相析出, Ti+Al 含量过高时, 合金会有 σ 相析出。Ti/Al 值会影响合金 γ' 强化相的体积分数和 γ/γ' 相晶格错配度。Ti/Al 值为 1.6 时, 合金具有较高的 γ' 体积分数和晶格错配度, 同时合金中没有 η 相析出。因此, 合金设计中控制 Ti/Al 值为 1.6 可以获得较高的第二相强化效果和组织稳定性。增加 Ti+Al 含量会提高合金 γ' 强化相的体积分数和晶格错配度。

(2) 增加 Co 含量可以抑制合金中析出 η 相, 但是会增加合金中 σ 相的析出倾向。同时, Co 含量的增加会扩大合金的加工窗口, 提高合金平衡态时的晶格错配度, 因此提高合金中的 Co 含量可以改善合金的加工性能, 同时除了固溶强化外, 在析出强化上也能对合金强化起到一定作用。

参考文献

- [1] Xu Z L. *Properties and Strength Design and Engineering Application of High Temperature Materials*. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 25
(徐自立. 高温金属材料的性能、强度设计及工程应用. 北京: 化学工业出版社, 2006: 25)
- [2] Huang Q Y, Li H K, Chen G L, Guo J T, Zhang S S, Zhou R F, Ding G S, Liu G Z. *Superalloys*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2000: 48
(黄乾尧, 李汉康, 陈国良, 郭建亭, 张舒声, 周瑞发, 丁桂山, 柳光祖. 高温合金. 北京: 冶金工业出版社, 2000: 48)
- [3] Gu Y F, Harada H, Cui C Y, Ping D H, Sato A, Fujioka J. *Scr Mater*, 2006; 55: 815
- [4] Cui C Y, Gu Y F, Ping D H, Harada H. *Metall Mater Trans*, 2009; 40A: 282
- [5] Gu Y F, Cui C Y, Harada H, Fukuda T, Ping D H, Mistushashi A, Kato K, Kobayashi T, Fujioka J. In: Reed R C, Green K A, Caron P, Gabb T P, Fahrman M G, Huron E S, Woodard S A, eds., *Superalloys 2008*, PA: TMS, 2008: 53
- [6] Guo J T. *Acta Metall Sin*, 1978; 14: 227
(郭建亭. 金属学报, 1978; 14: 227)
- [7] Liu J Q, Zeng Y P, Xie X S. *Mater Rev*, 2007; 21: 119
(刘建强, 曾燕屏, 谢锡善. 材料导报, 2007; 21: 119)
- [8] Dong J X, Zhang M C, Zeng Y P. *Rare Met Mater Eng*, 2005; 34: 51
(董建新, 张麦仓, 曾燕屏. 稀有金属材料与工程, 2005; 34: 51)
- [9] Dong J X, Li A, Zhang M C. *J Mater Eng*, 2003; 9: 7
(董建新, 李 昂, 张麦仓. 材料工程, 2003, 9: 7)
- [10] Saunders N, Guo Z, Li X, Miodownik A P, Schille J. In: Green K A, Pollock T M, Harada H, Howson T E, Reed R C, Scirra J J, Walston S, eds., *Superalloys 2004*, PA: TMS, 2004: 849

- [11] Saunders N. In: Kissinger R D, Deye D J, Anton D L, Cetel A D, Nathal M V, Pollock T M, Woodford D A, eds., *Superalloys 1996*, PA: TMS, 1996: 101
- [12] Saunders N, Miodownik A P, Schille J. *J Mater Sci*, 2004; 39: 7237
- [13] Saunders N, Guo Z, Li X, Miodownik A P, Schille J. *JOM*, 2003; 55(12): 60
- [14] Cao W D, Kennedy R. In: Green K A, Pollock T M, Harada H, Howson T E, Reed R C, Scirra J J, Walston S, eds., *Superalloys 2004*, Seven Springs, PA: TMS, 2004: 91
- [15] Guo J T. *Materials Science and Engineering for Superalloys*. Beijing: Science Press, 2008: 109, 292
(郭建亭. 高温合金材料学 (上册). 北京: 科学出版社, 2008: 109, 292)
- [16] Cui C Y, Gu Y F, Ping D H, Harada H, Fukuda T. *Mater Sci Eng*, 2008; A485: 651

www.cnki.net