

引用格式: 邓睿, 文新理, 张朝磊. 大尺寸定向柱晶空心透平叶片材料 DZ411G 热力学分析[J]. 中国材料进展, 2024, 43(12): 1145–1152.

DENG R, WEN X L, ZHANG C L. Thermodynamic Analysis of Large-Size Oriented Cylindrical Hollow Turbine Blade Material DZ411G[J]. Materials China, 2024, 43(12): 1145–1152.

大尺寸定向柱晶空心透平叶片材料 DZ411G 热力学分析

邓睿¹, 文新理¹, 张朝磊²

(1. 北京北冶功能材料有限公司, 北京 100192)

(2. 北京科技大学 碳中和创新研究院, 北京 100083)

摘要: 高温合金由于其优异的综合高温性能被应用于航空发动机、燃气轮机等热端部件的制造, 随着装备设计对材料服役温度要求的日益提高, 对高温合金的综合性能要求越来越严苛, 具有更加优异性能的改型合金不断诞生。以我国某新型重型燃气轮机大尺寸定向柱晶空心透平叶片用改型合金 DZ411G 为研究对象, 借助相图计算软件 JmatPro, 通过热力学计算分析了 C, Al, Ti, Cr, Ta 等元素对主要合金相的开始析出温度、最大析出量、固液相线、 γ/γ' 错配度等的影响规律, 为 DZ411G 合金化学成分优化、熔炼配入点设计及热处理工艺制定提供了依据。根据理论计算结果, 设计了合理的配入点, 并首次完成了 2.5 t DZ411G 母合金的工业化生产。

关键词: 大尺寸; 定向柱晶; 空心透平叶片; DZ411G; 热力学计算

中图分类号: TG111.3 文献标识码: A 文章编号: 1674-3962(2024)12-1145-08

Thermodynamic Analysis of Large-Size Oriented Cylindrical Hollow Turbine Blade Material DZ411G

DENG Rui¹, WEN Xinli¹, ZHANG Chaolei²

(1. Beijing Beiyue Functional Materials Corporation, Beijing 100192, China)

(2. Institute for Carbon Neutrality, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: High temperature alloy due to its excellent comprehensive high temperature performance is used in the manufacture of hot end parts of aircraft engines, gas turbines, etc., with the increasing requirements of equipment design for material service temperature, the comprehensive performance requirements of high temperature alloys are becoming more and more stringent, and modified alloys with better performance are constantly born. Taking the modified alloy DZ411G for large-size oriented cylindrical hollow blades of a new type of heavy-duty gas turbine in China as the research object, this paper analyzed the influence of C, Al, Ti, Cr, Ta and other elements on the initial precipitation temperature, maximum precipitation amount, solid-liquid phase line, γ/γ' mismatch degree of the main alloy phases with the help of phase diagram calculation software JmatPro, and provided a basis for the optimization of chemical composition of DZ411G alloy, the design of smelting inlet point and the formulation of heat treatment process. According to the theoretical calculation results, a reasonable formula was formulated, and the industrial production of DZ411G alloy was completed for the first time.

Key words: large size; oriented cylindrical; hollow turbine blade; DZ411G; thermodynamic calculation

收稿日期: 2023-02-19 修回日期: 2023-06-06

基金项目: 国家科技重大专项(J2019-VI-0020-0135)

第一作者: 邓睿, 男, 1995 年生, 硕士

通讯作者: 文新理, 男, 1983 年生, 正高级工程师,

Email: wen.xinli@163.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202302013

1 前言

透平叶片是重型燃气轮机中关键的部件, 我国研制的抗热腐蚀定向合金 DZ411 定向凝固高温合金与美国通用电气公司广泛使用的 GTD111 合金高温持久性能水平相当, 因具有优异的铸造性能、高温强度、高温抗氧化

等高温性能, 1980 年左右开始应用于大功率燃气轮机一级叶片, 后来逐步应用于燃机多级叶片及其他高温部件的生产^[1, 2]。为满足新一代重型燃气轮机的综合性能要求, 根据设计指标要求, 中国科学院金属研究所在 DZ411 基础上设计了新合金 DZ411G, 并由北京北冶功能材料有限公司开展 DZ411G 超纯净母合金工业化制备技术攻关, 从而解决了重型燃机用新型定向柱晶空心叶片研制的“卡脖子”难题。

作为叶片材料, DZ411G 合金与 DZ411 一样, 面临高温环境下服役工况恶劣的情况, 对材料稳定性、安全性要求极高^[3, 4]。成分体系与 DZ411 相同, DZ411G 合金也以 γ 相为基体, 以 γ' 相 $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti}, \text{Ta})$ 为主要强化相, 同时加入 Ta, Ti 形成碳化物实现析出强化^[5]。该合金中添加元素种类多, 交互作用复杂, 对合金析出相的影响规律复杂。同时热处理工艺、制造工艺等加工参数对合金的组织、性能均影响明显^[6]。掌握各元素对合金相转变等热力学行为的影响, 对合金成分优化设计、性能调控和稳定批量生产都具有重要意义, 对燃气轮机叶片材料的不断改型发展也具有一定借鉴意义。

2 实验

利用 JmatPro 软件中的镍基合金数据库进行 DZ411G 合金热力学模拟, 将合金元素成分和温度参数作为输入的基本条件, 利用系统中各相之间的热力学函数关系计算在对应成分和温度下合金可能存在的平衡相。本工作通过改变合金中 C, Al, Ti, Cr, Ta 等元素含量, 控制其他元素含量不变, 计算得到不同条件下的平衡相图, 从相图中获取关键数据, 分析合金中相组成的变化及各相析出温度变化情况, 从而揭示所研究的各个元素对 DZ411G 合金析出相的影响规律。

如表 1 所示, 设计 C 元素含量范围为 0.01%~0.19% (质量分数, 下同), Cr 元素含量范围为 11%~15.5%, Ta 元素含量范围为 1.2%~4.8%, Al 元素含量范围为

2.2%~4.0%, Ti 元素含量范围为 3.9%~4.8%。计算过程采用控制变量法, 在分析某一元素的影响时, 控制其他元素含量保持在某一固定值不变, 各元素含量的固定值分别为: C 0.105%、Al 3.25%、Ti 4.45%、Ta 3.6%、Cr 14%。

表 1 各元素含量设计值
Table 1 Design values for each element ($w/\%$)

Number	C	Cr	Ta	Al	Ti
1	0.01	11.0	1.2	2.2	3.9
2	0.03	11.5	1.6	2.4	4.0
3	0.05	12.0	2.0	2.6	4.1
4	0.07	12.5	2.4	2.8	4.2
5	0.09	13.0	2.8	3.0	4.3
6	0.11	13.5	3.2	3.2	4.4
7	0.13	14.0	3.6	3.4	4.5
8	0.15	14.5	4.0	3.6	4.6
9	0.17	15.0	4.4	3.8	4.7
10	0.19	15.5	4.8	4.0	4.8

3 结果与分析

3.1 DZ411G 热力学平衡相图

图 1 为典型成分的 DZ411G 合金热力学平衡相图, 合金相主要有 γ/γ' 相、 $\text{MC}/\text{M}_{23}\text{C}_6$ 型碳化物、 $\text{MB}_2/\text{M}_3\text{B}_2$ 型硼化物。从 600~1156.5 $^{\circ}\text{C}$, 随着合金温度升高, γ' 相体积分数减少, γ 相体积分数增加。在 1300~1310 $^{\circ}\text{C}$, MC 型碳化物和 γ 相几乎同时开始析出, 当温度降低到 1156 $^{\circ}\text{C}$ 左右时, γ 相中开始析出强化相 γ' 相。随着温度降低, MC 型碳化物在 1200 $^{\circ}\text{C}$ 以上快速析出约 1.02% 后含量基本保持稳定, 随温度进一步降低至 980 $^{\circ}\text{C}$ 左右, 碳化物析出类型转变为 M_{23}C_6 型。当温度在 1015~1282 $^{\circ}\text{C}$ 区间时, MB_2 硼化物析出, 最大析出量为 0.12%, 当温度低

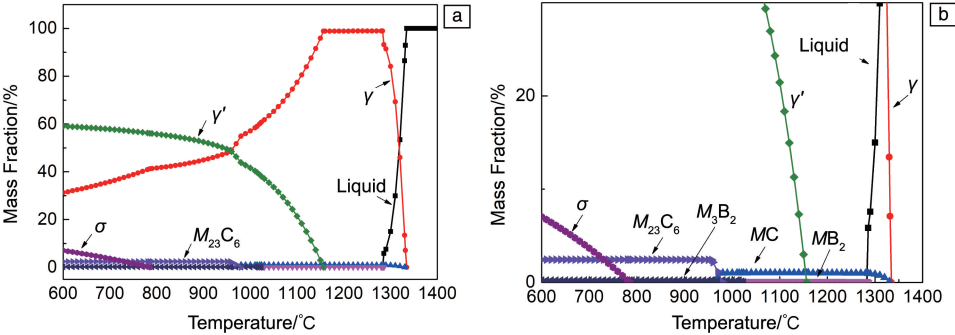


图 1 DZ411G 典型成分合金热力学平衡相图: (a) 整体, (b) 局部

Fig. 1 Thermodynamic equilibrium phase diagram of DZ411G typical composition alloy: (a) whole, (b) partial

于 1024 ℃ 后, 转变为析出 M_3B_2 型。另外, 该成分下合金还可能析出 σ 相, 当温度达到 785 ℃ 左右时开始逐渐析出, σ 相(BCC 结构)是一种脆性有害相, 当 Co, Cr, Mo 含量较高时, 形成针状(Cr, Mo)(Ni, Co)析出相, 且其原子堆积密度高、晶体结构复杂, 在 σ 相与基体界面处易产生裂纹; 当 σ 相析出量增大, 体积分数相对较高时, 虽然不会使合金变脆, 但是随着长期高温服役, 会使合金强度

下降, 显著劣化其高温持久寿命和冲击韧性^[7, 8]。

表 2 是 DZ411G 合金中各析出相平衡成分, 析出温度高的 MC 型碳化物主要富集 Ti, Ta, W 等熔点较高的元素, 而析出温度较低的 $M_{23}C_6$ 型碳化物主要富集 Cr, Mo, W 等元素。 MB_2 型硼化物主要富集 Ti 元素, M_3B_2 型硼化物主要富集 Cr, Mo, W 等元素。而 σ 相以 Co, Cr, Mo 等元素为主。

表 2 DZ411G 各析出相对应的平衡成分

Table 2 Equilibrium composition corresponding to each precipitation of DZ411G (w / %)

Phase	Ni	Al	Co	Cr	Mo	Ta	Ti	W	B	C
γ	60.31	3.28	9.58	14.12	1.41	3.28	4.14	3.88	—	0.004
γ'	69.74	5.53	6.5	3.1	0.17	4.84	8.36	1.78	—	—
MC	—	—	—	0.36	0.19	42.2	39.21	5.95	—	12.08
$M_{23}C_6$	4.92	—	2.49	68.29	12.79	—	—	6.48	0.009	5.03
MB_2	—	—	—	0.005	0.003	—	68.88	—	31.12	—
M_3B_2	0.18	—	0.15	21.77	62.97	0.06	—	6.81	8.06	—
σ	16.2	—	19.79	52.55	7.8	—	—	3.66	—	—

3.2 C 含量对析出相的影响

C 元素含量对合金平衡相的影响主要体现在: 固液相线温度、碳化物的析出温度和析出量等方面, 通过计算不同 C 含量的平衡相图, 得到 C 含量对合金析出相和错配度影响变化曲线, 如图 2 所示。

DZ411G 合金液相线、固相线温度随 C 含量变化的变化趋势如图 2a 所示, 随 C 含量从 0.01% 增加至 0.19%, 固相线变化幅度很小, 从 1277.1 升高至 1287.9 ℃; 但液相线受 C 含量影响较大, C 含量从 0.01% 增加至 0.11%, 液相线温度从 1339.6 缓慢降低至 1334.2 ℃, 而当 C 含量继续增大到 0.19%, 液相线温度快速升高至 1452.0 ℃。合金的凝固区间——固液相线温度差 (ΔT) 是表征合金凝固过程的关键参数之一, 当溶质原子分配系数一定时, ΔT 越大完全凝固越晚, 导致合金成分偏析越严重, 同时共晶含量增加, 合金热塑性也显著变差。为控制成分偏析同时保证合金具有较为良好的热塑性, 需要合理控制合金元素含量以减小合金的凝固区间, 因此, C 含量应不大于 0.11%, 而 C 含量在 0.01% ~ 0.11% 时, 随 C 含量增加, ΔT 缓慢减小, 因此合金的 C 含量应选择靠近 0.11% 为宜。

合金中碳化物开始析出温度随 C 含量变化趋势如图 2b 所示, 其中 MC 型碳化物析出温度随 C 含量增加逐渐增加, 当 C 含量小于 0.11% 时, MC 碳化物析出温度随 C 含量增加缓慢提高(1283.6~1332.5 ℃), 当 C 含量大于 0.11% 时, MC 碳化物析出温度随 C 含量增加快速增加,

并不断接近液相线温度(1332.5~1452.0 ℃)。

当合金中 C 含量增加时, MC 和 $M_{23}C_6$ 型碳化物的最大析出量均增加, 最大析出量与 C 含量基本呈线性关系, 因此在 C 含量为 0.01% ~ 0.19% 时, 可以根据所冶炼合金 C 含量估计合金中碳化物的含量。从图 2c 可知, 随 C 含量提高, $M_{23}C_6$ 最大析出量增加速率显著大于 MC 析出量增速。研究表明, 少量的小颗粒 MC 相存在于晶界, 产生的钉扎作用有利于阻碍晶粒长大, 从而有利于提高合金在高温环境服役时的组织稳定性, 同时 $M_{23}C_6$ 相是 MC 相分解形成的, 通常呈断续网状, 沿晶界存在, 导致晶界强度降低, 对合金高温性能不利。因此, 需要控制合金中 C 含量, 从而实现在高温环境服役时对 MC 和 $M_{23}C_6$ 相比比例的控制。

高温合金中 γ' 为 L12 有序相, 在 γ 基体中以共格形式弥散析出, 由于 γ' 和 γ 相晶格常数具有差异, 会导致其共格界面具有一定的错配度, 而错配度会导致弹性应变能的产生, 错配度越大, 所产生的弹性应变能越大, 从而影响 γ' 相的长大, 因此 γ/γ' 错配度是影响合金高温组织稳定性和持久寿命的重要因素。由图 2d 可见, 在同一温度下, γ/γ' 错配度随 C 含量增加而增加; 对于 DZ411G, 当 C 含量一定时, 合金中 γ/γ' 错配度随着温度升高逐渐降低, 到温度升高至 900~1000 ℃, γ/γ' 错配度变为负, 但绝对值逐渐增大。这是由于, 一方面, 不同相晶格膨胀系数不同, 因此温度升高会导致晶格错配度发生变化; 同时, 随着温度升高, 原子扩散能力提高,

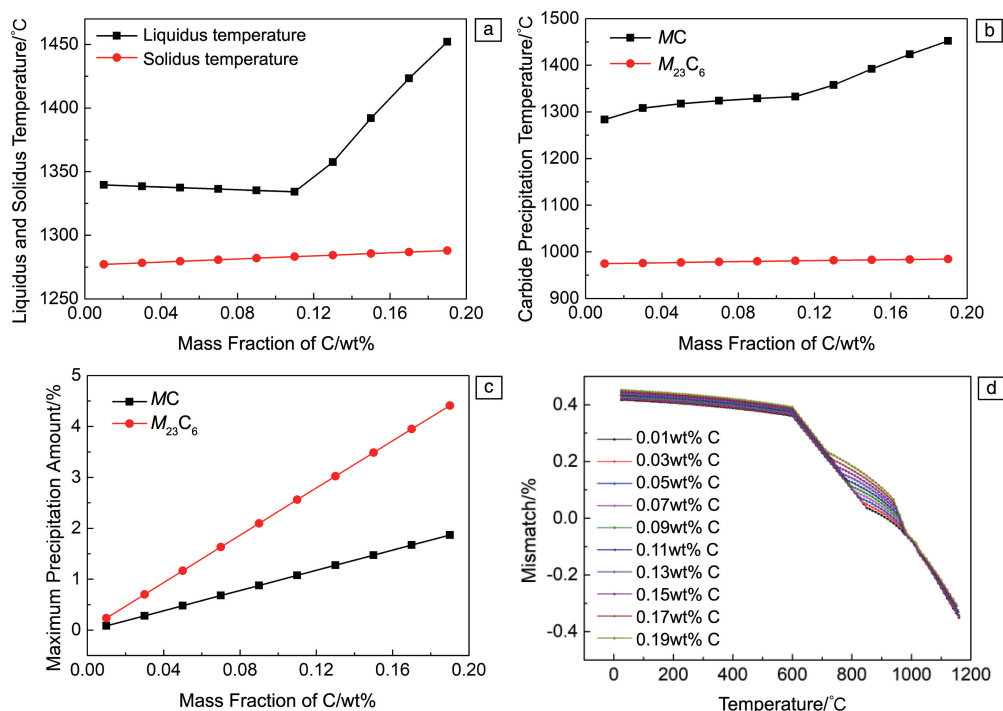


图2 C元素对DZ411G合金相图影响: (a)固液相线, (b)碳化物析出温度, (c)碳化物最大析出量, (d) γ/γ' 相错配度

Fig. 2 Influence of element C content on the phase diagram of DZ411G alloy: (a) solid-liquid cotoline, (b) carbide precipitation temperature, (c) maximum amount of carbide precipitation, (d) γ/γ' phase mismatch

使 γ/γ' 相之间成分差异减小,从而降低错配度;另一方面,随着温度升高,合金中的 γ' 相逐渐回溶,在900~1000℃时, γ' 含量少于 γ 相含量。因此,合金中 γ/γ' 错配度绝对值随温度升高呈现为逐渐降低后再次升高的趋势。

3.3 Al含量对析出相的影响

Al元素含量对合金平衡相的影响主要体现在:固液相线温度、碳化物的析出温度、 γ' 相和 σ 相开始析出温度和最大析出量、错配度等,随Al含量变化各研究指标变化趋势见图3。

随着DZ411G合金中Al含量从2.2%增加至4.0%,液相线温度从1344.2降低至1332.9(Al含量为3.4%时)后升高至1369.1℃,固相线温度变化不大,从1284.5降低至1279.1℃。可见,当Al含量大于3.4%时,随着Al含量的增加,钢液凝固过程中产生的偏析程度不断加重,因此需要合理控制合金中Al元素的加入量。

随着DZ411G合金中Al含量从2.2%增加至4.0%, γ' 相开始析出温度从1109.7逐渐升高至1177.1℃,MC碳化物开始析出温度从1330.5升高至1369.1℃, $M_{23}C_6$ 析出温度从913.4升高至1018.4℃, σ 相开始析出温度从573.6升高至917.7℃。

Al含量增加时,合金中 γ' 相和 σ 相最大析出量也会发生变化,当Al含量从2.2%增加至4.0%, γ' 相最大析

出量从48.34%增加至67.64%, σ 相最大析出量从5.88%增加至15.95%,每增加0.2%Al时, σ 相的最大析出量增加0.52%~2.24%,在Al含量从3.2%增加到3.4%时, σ 相最大析出量增加0.52%,在Al含量从3.6%增加到3.8%时, σ 相最大析出量增加2.24%。 γ' 相含量增加可以提高合金的强度,而 σ 相的增加会对合金起劣化作用,因此,为提高 γ' 相含量而增加Al的添加量时应考虑 σ 相析出量增加带来的不利影响。

γ' 相和 γ 相晶格常数的大小取决于 γ' 相和 γ 相中固溶原子的大小及数量,因此合金元素配比一定程度上会影响 γ' 相和 γ 相的晶格常数^[9],最终影响 γ/γ' 错配度。当Al含量增加时,合金的 γ/γ' 错配度降低,当Al含量一定时,合金中 γ/γ' 错配度绝对值随着温度升高逐渐降低,达到950℃左右时开始再次升高。

3.4 Ti含量对析出相的影响

Ti元素含量变化时固液相线温度、碳化物的析出温度、 γ' 相和 σ 相开始析出温度和最大析出量、错配度等研究指标变化趋势见图4。如图4a所示,随着Ti元素含量从3.9%增加到4.8%,液相线温度从1342.2逐渐降低至1320.2℃,固相线温度从1290.5降低至1277.8℃,随着Ti含量增加, ΔT 基本无变化,可见钢液的偏析倾向无明显变化。

随着Ti含量从3.9%增加至4.8%,各相开始析出温

度变化曲线见图 4b, γ' 相开始析出温度从 1143.1 逐渐升高至 1164.1 $^{\circ}\text{C}$, MC 碳化物开始析出温度从 1334.6

略有降低至 1332.1 $^{\circ}\text{C}$, $M_{23}\text{C}_6$ 析出温度从 977.5 升高至 982.5 $^{\circ}\text{C}$, σ 相开始析出温度从 715.5 升高至 829.9 $^{\circ}\text{C}$ 。

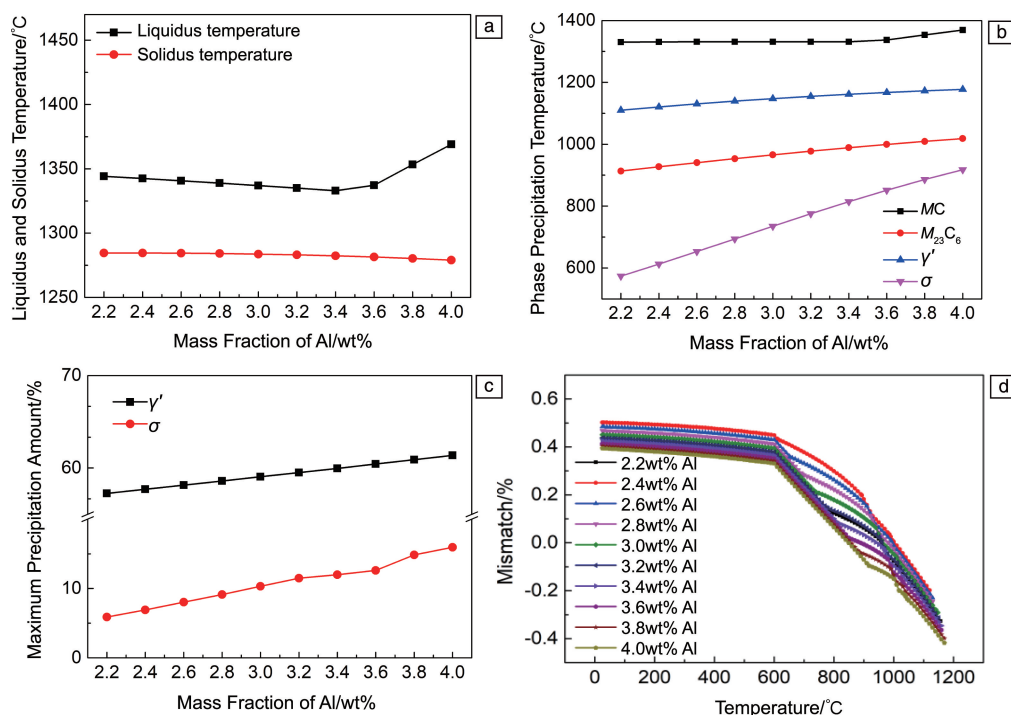


图 3 Al 元素对 DZ411G 合金相图影响: (a) 固液相线, (b) 相析出温度, (c) γ' 和 σ 相最大析出量, (d) γ/γ' 相错配度

Fig. 3 Influence curves of element Al content on the phase diagram of DZ411G alloy: (a) solid-liquid cotoline, (b) phase precipitation temperature, (c) maximum amount of γ' and σ phase precipitation, (d) γ/γ' phase mismatch

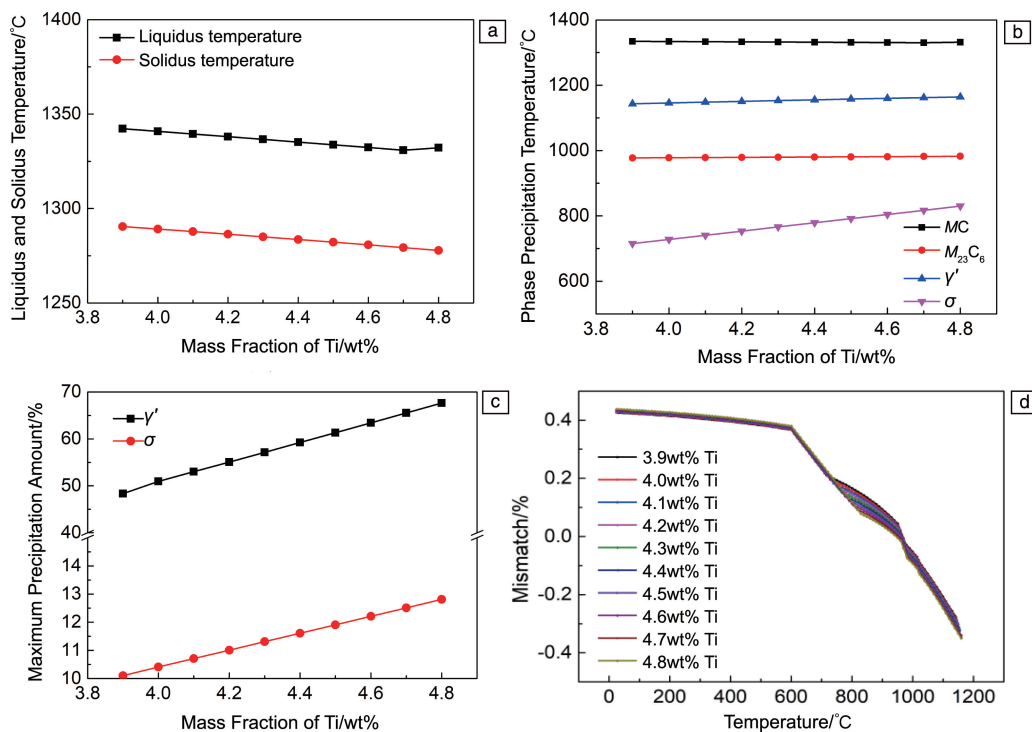


图 4 Ti 元素对 DZ411G 合金相图影响: (a) 固液相线, (b) 相析出温度, (c) γ' 和 σ 相最大析出量, (d) γ/γ' 相错配度

Fig. 4 Influence of element Ti on the phase diagram of DZ411G alloy: (a) solid-liquid cotoline, (b) phase precipitation temperature, (c) maximum amount of γ' and σ phase precipitation, (d) γ/γ' phase mismatch

随着合金中 Ti 含量从 3.9% 增加至 4.8%, γ' 相最大析出量从 57.26% 增加到 61.36%, σ 相最大析出量从 10.1% 增加到 12.81%, Ti 每增加 0.1%, σ 相的最大析出量增加 0.3%。可见 Ti 元素对 γ' 相和 σ 相析出量的贡献显著小于 Al 元素(图 4c)。

从图 4d 可以看出, 当 Ti 含量增加时, 合金的 γ/γ' 错配度逐渐降低, 在 0~1200 °C 各温度下, γ/γ' 相错配度差异较小, 可见 Ti 含量在 3.9%~4.8% 变化时, 对合金 γ/γ' 错配度影响较小。

3.5 Ta 含量对析出相的影响

随着 Ta 含量从 1% 提高至 4.8%, 固液相线温度变化曲线见图 5a, 液相线温度从 1348.8 °C 降低至 1327.3 °C, 固相线温度从 1302.1 °C 降低至 1272.2 °C, 固相线温度降低速率约为液相线的 1.5 倍。Ta 元素偏析会导致液相密度增加, 随着 Ta 含量增加, 枝晶间的 Ta 含量增加, 合金中宏观偏析程度加重, 因此可以通过调整合金中加入的 Ta 含量来调控铸锭中糊状区枝晶间液体的密度, 从而降低铸件中雀斑等缺陷的数量和形成倾向^[10-12]。

随着 Ta 含量从 1% 提高至 4.8%, 各相开始析出温

度变化见图 5b, 其中 σ 相的析出温度从 658.4 °C 升高至 850.4 °C, 其他各相的析出温度变化较小。

随着 Ta 含量从 1% 提高至 4.8%, γ' 相最大析出量从 56.57% 增加到 61.53%, σ 相最大析出量从 2.03% 增加到 12.78%。每增加 0.4% Ta 时, σ 相的最大析出量增加 0.69%~1.78%, 在 Ta 含量从 1.6% 增加到 2.0% 时, σ 相最大析出量增加 0.69%, 在 Ta 含量从 2.0% 增加到 2.4% 时, σ 相最大析出量增加 1.78% (图 5c)。从表 2 可以看出, σ 相中 Co, Cr, W 等固溶强化元素约占 75%, 远超 γ 相中的含量, 因此, σ 相析出会造成其周围基体相中强化元素的贫化, 从而使局部塑性增加。随着 σ 相析出量提高, 软化区域比例增高, 从而使 DZ411G 合金强度降低^[13]。而随着 Ta 的增加, γ' 相中的 Al 原子会逐渐被 Ta 原子替换, 而 Ta 在 γ' 相中扩散速率更低, 在高温长时间服役时, γ' 相粗化速率更低^[14]。

由于 Ta 原子半径较大, 当 Ta 含量增加时, 进入 γ' 相的 Ta 原子越多, 从而导致 γ' 相晶格常数增大, 使 γ 相和 γ' 相之间晶格常数差距增加, 从而使得合金的 γ/γ' 错配度逐渐增加(图 5d)。

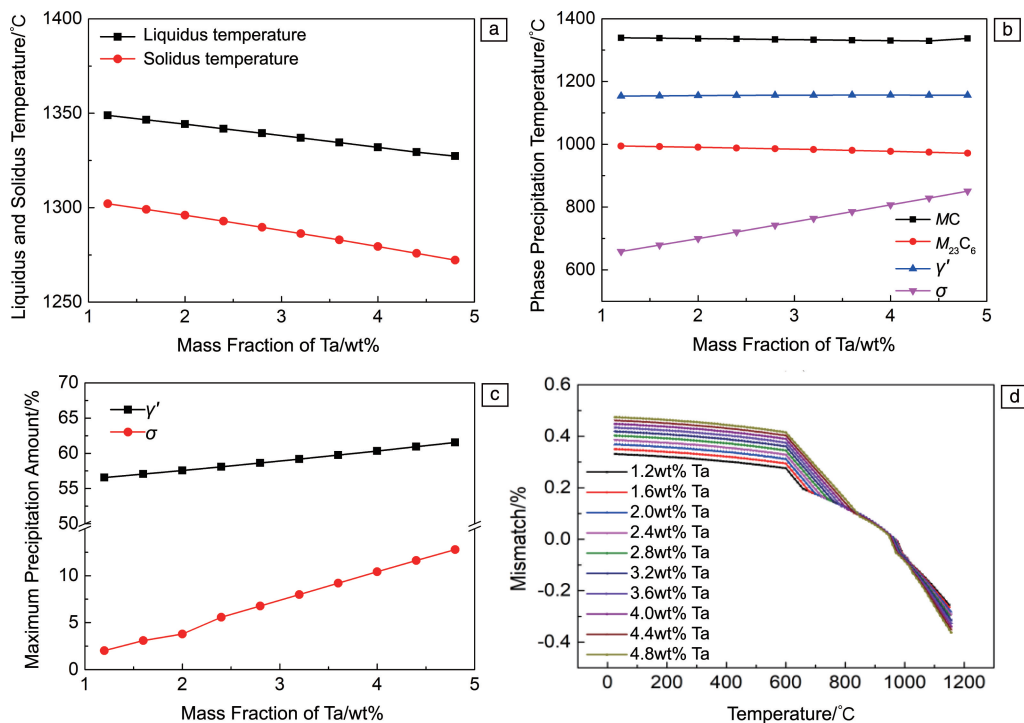


图 5 Ta 元素对 DZ411G 合金相图影响: (a) 固液相线, (b) 相析出温度, (c) γ' 和 σ 相最大析出量, (d) γ/γ' 相错配度

Fig. 5 Influence curves of element Ta content on the phase diagram of DZ411G alloy: (a) solid-liquid cotemperature, (b) phase precipitation temperature, (c) maximum amount of γ' and σ phase precipitation, (d) γ/γ' phase mismatch

3.6 Cr 含量对析出相的影响

Cr 元素主要存在于 γ 基体、 $M_{23}C_6$ 碳化物、 σ 相中, 当 Cr 含量提高时, 晶界上可以析出不连续的 $M_{23}C_6$ 碳化

物来强化晶界, 但 Cr 密度较高, 随 Cr 含量提高, 有害的 σ 相析出量增大从而导致合金劣化, 组织稳定性变差。另外, 与合金中的 W, Ta 等高熔点元素相比, Cr 的强化

能力明显较差, 因此, 当需要提高合金的高温强度时应当控制 Cr 含量的上限, 并增加 W, Ta 等高熔点元素含量。

Cr 元素含量对合金平衡相的影响主要体现在: 固液相线温度、碳化物和 σ 相开始析出温度、 σ 相最大析出量、错配度等。

Cr 含量对固液相线的影响如图 6a 所示, 当 Cr 含量从 11% 增加到 15%, 固液相线温度均逐渐降低, 其中液相线温度从 1348.8 降低至 1337.3 $^{\circ}\text{C}$, 固相线温度从 1302.1 降低至 1272.2 $^{\circ}\text{C}$, ΔT 变化基本不大, 可见 Cr 含量在 11%~15% 波动时合金凝固过程中的偏析程度变化不大。

随着 Cr 含量变化合金中碳化物相、 γ' 相和 σ 相开始析出温度变化趋势见图 6b。可见, 随着 Cr 含量增大, MC 型碳化物和 γ' 相的开始析出温度略有下降, $M_{23}C_6$ 型碳化物开始析出温度稍有提高, 而 σ 相开始析出温度快

速降低后不断提高。Cr 含量为 15% 时 σ 相在 883.6 $^{\circ}\text{C}$ 时即开始析出。

图 6c 是随着 Cr 含量变化 σ 相最大析出量的变化曲线, Cr 元素密度较高, 是 σ 相的形成元素^[15], Cr 含量从 11% 提高至 15.5%, σ 相最大析出量从 4.43% 提高至 15.42%。因此, 随着 Cr 含量增加, σ 相的开始析出温度和最大析出量均显著提高, 每增加 1% Cr 时 σ 相的最大析出量增加 2.44%。为了保证合金的高温强度和组织长期稳定性, 需要选择较低的 Cr 含量水平, 以尽量延后 σ 相的析出时间及降低 σ 相的析出量。

当 Cr 含量增加时, 合金的 γ/γ' 错配度逐渐降低, 在 600 $^{\circ}\text{C}$ 以上, 随温度升高, 合金的 γ/γ' 错配度降低速率增加, 是由于在 600 $^{\circ}\text{C}$ 以上, 随着温度变化 γ' 和 γ 相相对含量变化更快(图 6d)。

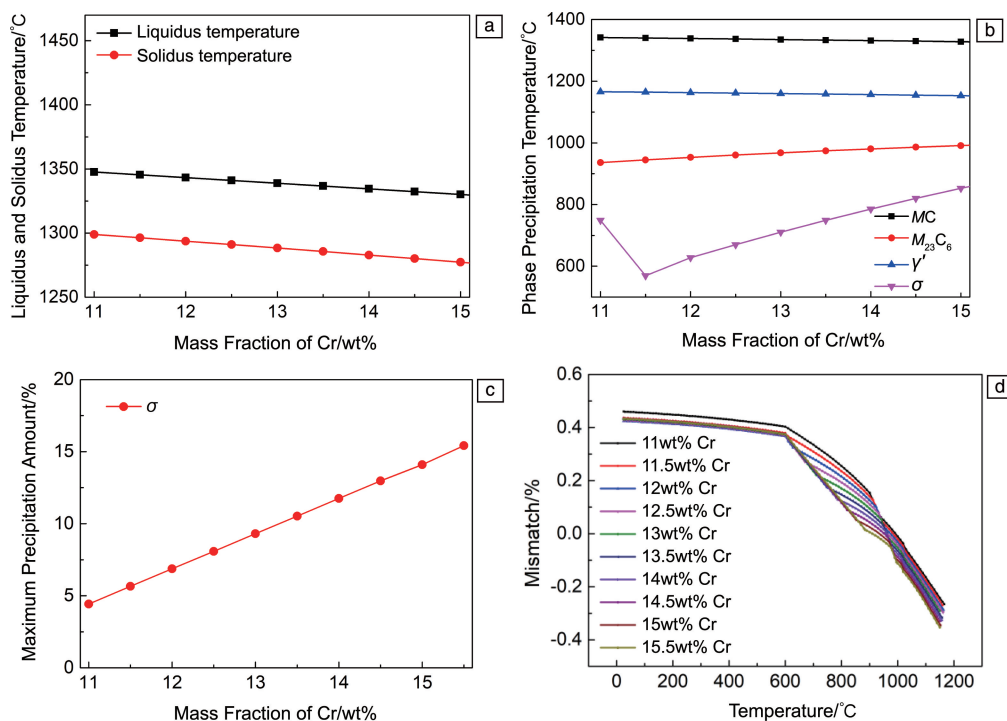


图 6 Cr 元素对 DZ411G 合金相图影响: (a) 固液相线, (b) 相析出温度, (c) σ 相最大析出量, (d) γ/γ' 相错配度

Fig. 6 Influence of element Cr content on the phase diagram of DZ411G alloy: (a) solid-liquid coteline, (b) phase precipitation temperature, (c) maximum amount of σ phase precipitation, (d) γ/γ' phase mismatch

4 工业生产

依据理论分析, 对各个主元素的配入量进行了优化, 并制定了合理的熔炼工艺, 利用北京北冶公司的 3 t 真空感应熔炼炉, 完成了 DZ411G 合金工业化生产。技术标准要求 O, N, S 元素质量分数总和不大于 20 ppm, 45 种痕量元素质量分数总和不大于 200 ppm。经测试, 工业生产

的合金中 O, N, S 元素质量分数总和为 11.3~13.3 ppm, 45 种痕量元素质量分数总和小于 30 ppm, 满足技术要求。

5 结论

(1) DZ411G 合金的平衡相主要有 γ' 相、MC 相、 $M_{23}C_6$ 相, 此外还有少量的 σ 相。其中, C 元素主要影响液相线温度及碳化物的析出量; Al 和 Ti 元素主要影响

σ 相的析出温度及最大析出量、 γ' 相最大析出量; Cr 和 Ta 主要影响 σ 相的析出温度及最大析出量。随各个强化元素含量增加, σ 相最大析出量均有所增加, 各个元素对 σ 相最大析出量的影响程度排序为: Al>Ti>Ta>Cr。

(2) 随着 C, Al, Ta 含量增加, 元素液固相线温度差(ΔT)逐渐增大且较为明显, 其中 C 和 Al 对偏析倾向增大贡献最大, Ta 对偏析倾向增大贡献较小。

(3) 在 900~1000 °C 左右, γ/γ' 相错配度绝对值相对较小, DZ411G 合金在该温度段附近服役时, 组织长期稳定性好, 蠕变寿命较长。

(4) 基于本文研究, 在元素控制范围内进一步提出了 C, Cr, Al, Ti, Ta 等元素的配入点, 确定了合理的熔炼工艺和浇注工艺, 利用北冶公司 3 t 真空感应熔炼炉实现了首次工业化冶炼 DZ411G, 并交付母合金产品 2.5 t, 该产品已成功应用于重型燃机大尺寸定向柱晶空心透平叶片试制。

参考文献 References

- [1] SAJJADI S A, NATEGH S. Materials Science and Engineering: A [J], 2001, 307(1/2): 158–164.
- [2] SAJJADI S A, NATEGH S, GUTHRIE R. Materials Science and Engineering: A [J], 2002, 325(1/2): 484–489.
- [3] 王威, 姜祥伟, 高志坤, 等. 机械工程材料 [J], 2019, 43(3): 17–23.
WANG W, JIANG X W, GAO Z K, *et al.* Materials for Mechanical Engineering [J], 2019, 43(3): 17–23.
- [4] 许辉, 郭延军, 王江伟, 等. 稀有金属材料与工程 [J], 2023, 52(6): 2057–2062.
XU H, GUO Y J, WANG J W, *et al.* Rare Metal Materials and Engineering [J], 2023, 52(6): 2057–2062.
- [5] 李辉, 楼琅洪, 史学军, 等. DZ411(DSM11) 合金 γ' 相粗化与持久性能 [C]. 上海: 中国金属学会, 2007: 402–404.
LI H, LOU L H, SHI X J, *et al.* γ' Phase Roughening and Durable Properties of DZ411(DSM11) Alloy [C]. Shanghai: Chinese Society for Metals, 2007: 402–404.
- [6] TSAI Y L, WANG S F, BOR H Y, *et al.* Materials Science & Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure & Processing [J], 2013, 571(Jun. 1): 155–160.
- [7] 吴保平, 吴剑涛, 李俊涛. 材料热处理学报 [J], 2019, 40(6): 52–60.
WU B P, WU J T, LI J T. Transactions of Materials and Heat Treatment [J], 2019, 40(6): 52–60.
- [8] 侯介山, 郭建亭, 袁超, 等. 金属学报 [J], 2016, 52(2): 168–176.
HOU J S, GUO J T, YUAN C, *et al.* Acta Metallurgica Sinica [J], 2016, 52(2): 168–176.
- [9] 陈晶阳, 赵宾, 冯强, 等. 金属学报 [J], 2010, 46(8): 897–906.
CHEN J Y, ZHAO B, FENG Q, *et al.* Acta Metallurgica Sinica [J], 2010, 46(8): 897–906.
- [10] YAMASHITA M, KAKEHI K. Scripta Materialia [J], 2006, 55(2): 139–142.
- [11] REED R C, TAO T. Acta Materialia [J], 2009, 57(19): 5898–5913.
- [12] 封少波, 张楠楠, 罗兴宏. 金属学报 [J], 2012, 48(5): 541–546.
FENG S B, ZHANG N N, LUO X H. Acta Metallurgica Sinica [J], 2012, 48(5): 541–546.
- [13] 郭建亭. 高温合金材料学 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
GUO J T. Materials Science of Superalloys [M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [14] 鲁力. 凝固方法及钽元素对定向凝固镍基高温合金 DZ411 微观组织演化的影响 [D]. 兰州: 兰州大学, 2022.
LU L. Solidification Method and Effect of Tantalum on Microstructure Evolution of Directional Solidification Nickel-Based Superalloy DZ411 [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2022.
- [15] CHEN J B, HUO Q, CHEN J Y, *et al.* Materials Science and Engineering: A [J], 2020, 799(2): 140163.

(编辑 费蒙飞)