

高强 GH4738 合金成分设计计算与验证

姚志浩¹, 董建新¹, 张麦仓¹, 张玉峰², 谢伟³, 李蓬川⁴

(1. 北京科技大学, 北京 100083)

(2. 中国石油集团渤海石油装备制造有限公司, 天津 300457)

(3. 宝钢特殊钢分公司, 上海 200940)

(4. 中国第二重型机械集团公司, 四川 德阳 608013)

摘要: 高强 GH4738 高温合金是超大功率烟气轮机/燃气轮机涡轮盘的候选材料, 利用 Thermo-Calc 及 JMatPro 软件进行成分设计优化及抗拉强度预测进而实验验证。研究了不同 C, Al, Ti 及 Cr 等元素对该合金中相析出规律及其合金力学性能的变化规律; 基于计算结果, 制备了不同 Al, Ti 含量的 GH4738 合金, 测试了其室温抗拉强度并对确定的超大型盘件用高强 GH4738 合金成分进行相分析研究。结果显示, C 含量的增加, 可促进碳化物 $M_{23}C_6$ 及 MC 析出量的增加及其回溶温度的提高, 但其对 γ' 相含量的变化几乎无影响; Al, Ti 含量的增加, 都可明显提高合金 γ' 相回溶温度及其析出量, 并有利于合金抗拉强度的提高; Cr 含量的增加, 可提高 γ' 相的回溶温度, 但对其析出量影响不大; 影响合金中 γ' 相回溶温度及析出量的合金元素顺序依次为 Al, Ti, Cr; 高强 GH4738 合金成分设计原则为适当降低 C 含量, 提高 Al, Ti 含量至合金成分范围高限; 高强 GH4738 合金中 γ' 相约占约 24.0%, 其点阵常数为 $a_0=0.357\sim 0.359$ nm, 其组成为: $(Ni_{0.9236}Co_{0.0415}Fe_{0.0025}Cr_{0.0322})_3(Cr_{0.0972}Al_{0.3585}Ti_{0.5059}Mo_{0.0366}Co_{0.0018})$ 。该研究结果为中国大尺寸 GH4738 难变形高温合金涡轮盘提供了的成分设计思路。

关键词: 高强 GH4738 合金; 涡轮盘; 合金设计; 力学性能; 相分析

中图分类号: TG135+.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)11-3382-06

目前, 具有中国自主知识产权的超大型 $\Phi 1450$ mm 烟气轮机 GH4738 合金涡轮盘已经制备成功^[1], 为今后发展超大功率烟气轮机/燃气轮机等动力机械奠定了基础。然而, 随着烟气轮机/燃气轮机功率的提高, 对该合金涡轮盘的强度提出了更高的要求。常规 GH4738 合金由于强度相对较低, 已很难适于超大功率烟气轮机/燃气轮机用超大型涡轮盘的应用。因此, 急需开展高强 GH4738 合金的研究工作。

由于涡轮盘制备工艺(冶炼、开坯、锻造和热处理等)^[2]很难从根本上提高合金强度, 而合金成分优化可在提高合金强度方面起到最为基础和关键的作用。因此, 合理设计合金成分^[3], 可为高强度超大型涡轮盘的成功制备奠定基础。

镍基高温合金主要通过 γ' 相和碳化物的析出来达到强化效果^[4], 因此合金成分优化主要针对 γ' 相和碳化物形成元素(Al、Ti、C 和 Cr 等)而展开。北京科技大学研究人员^[5-7]利用 Thermo-calc 软件研究了 GH4738 合金 Al、Ti 含量对 γ' 溶解温度和力学性能的

影响, 证实了 γ' 相含量随 Al+Ti 含量的增加而逐渐增加的现象。Chang 等^[8,9]研究了 Waspaloy 合金在室温和高温下 Al+Ti 含量对拉伸性能的影响。但对于 C、Cr 等碳化物形成元素对碳化物及 γ' 相的力学性能影响还没有系统研究。

由于高温合金制备周期长、成本高, 必须寻求更为经济合理的合金设计理念。近期著名 Nature 杂志刊出了 Pollock^[10]提出合金设计方法主要为 2 种方式, 一种为试错法, 即通过小批量不同成分的合金配比进行冶炼等测试, 寻找到最佳的合金成分; 另外一种方法为采用 Thermo-Calc 及 JmatPro 等计算方法优化合金成分, 以便选择最佳成分; 而 2 种方法各有优劣, 试错法研发成本较高, 但较为准确; 而通过计算机设计法则节约成本, 但最终需要实践验证。

本研究采用模拟计算与实验验证相结合的方式对超大型高强 GH4738 合金涡轮盘的化学成分进行优化设计。根据合金成分范围的优化计算结果, 进行实际多炉次成分冶炼和相应的拉伸性能研究, 择优确定涡轮盘

收稿日期: 2016-11-05

基金项目: 国家自然科学基金(51401020); 教育部博士学科点新教师专项科研基金(20130006120005); 北京市基金(2154051); 国家留学基金委资助

作者简介: 姚志浩, 男, 1982 年生, 博士, 副教授, 北京科技大学, 北京 100083, 电话: 010-62332884, E-mail: zhihao-yao@163.com

用高强 GH4738 合金最佳合金成分的控制标准, 以期锻造超大型 $\Phi 1450$ mm 涡轮盘奠定基础, 为其他合金成分优化和锻件制备研究提供参考。

1 实验

采用 Thermo-Calc 及 JMatPro 软件, 利用镍基数据库, 结合 GH4738 合金标准成分范围, 计算合金中的不同成分含量 (如 C、Al 和 Ti 等元素, 合金成分范围的确定主要根据 AMS5704 标准控制) 对强化相析出及其拉伸力学性能变化规律, 计算过程中其他元素取表 1 所示的合金成分范围中值为参考数据 (计算结果中, 相析出含量均为质量分数), 为实际制备高强性能的合金提供参考依据, 如表 1 所示。基于以上计算结果, 设计并冶炼了 7 种不同成分的 GH4738 合金, 经过相同的冶炼 (真空感应+电渣重熔+电弧重熔)、锻造成形及热处理工艺后, 针对获得的合金试样, 测定室温拉伸性能; 最终选定了高强 GH4738 合金成分, 并进行了合金制备及其显微组织和物理相分析研究。

该合金中 γ' 强化相显微组织的制备与组织观察方法: 试样经过机械磨光、抛光后电解抛光, 其中电解抛光液为 20% H_2SO_4 +80% CH_3OH , 电解抛光所用直流电压为 25~30 V, 时间为 15~20 s; 然后对电解抛光后的试样进行电解侵蚀, 其电解侵蚀的溶液为 150 mL H_3PO_4 +10 mL H_2SO_4 +15 g CrO_3 , 电解侵蚀所用的电压为 5 V, 时间为 5~10 s。对 γ' 相形貌的观察, 主要借助 LEO145 场发射电镜和 CAMBRIDGE S-360 扫描电镜。

2 结果与分析

2.1 C 含量对 $M_{23}C_6$ 及 MC 回溶温度及析出量的影响

利用 Thermo-Calc 软件进行计算, 计算不同 C 成分变化对碳化物影响规律, 获得如下计算结果。在 GH4738 合金中, 调整 C 含量的成分在 0.02%~0.08% 范围内, 图 1a, 1b 为 GH4738 合金中 C 元素对析出相 MC 及 $M_{23}C_6$ 碳化物及 γ' 相的影响规律。可以发现, 随着碳含量的增加, MC 及 $M_{23}C_6$ 碳化物的回溶温度升高及析出量增加; 由图 1a 可知, C 含量由 0.02% 增加至 0.08%, 其合金中的 $M_{23}C_6$ 回溶温度变化基本在 977~979 $^{\circ}C$ 范围内, 而 MC 回溶温度变化范围在 1240~1319 $^{\circ}C$; 当 C 含量从 0.02% 增加到 0.03% 时, MC 回溶温度变化程度增加明显; 当 C 含量进一步增加, 其回溶温度变化不大。由此可知, 合金中 C 含量在 0.02%~0.03% 可作为元素重要控制范围。如图 1b 所示, 当 C 含量由 0.02% 增加到 0.08% 时, 从碳化物析出量变化规律看, $M_{23}C_6$ 析出量从 0.4%~1.6%, MC 析出量从 0.08% 增加到 0.4%。从图 1c 中可知, C 含量从 0.02% 增加到 0.08% 时, 合金中 γ' 相的析出量几乎没有变化; 而对于 γ' 相回溶温度的影响, 则随着 C 含量的增加, 其回溶温度由 1032 $^{\circ}C$ 降低到 1018 $^{\circ}C$ 。

由于影响合金力学性能的因素较多, 除了合金成分外, 还会受到晶粒尺寸、析出相分布状态等影响。为了使 JmatPro 软件的力学性能计算结果具有可对比性, 计算初始设定条件, 除了设定研究的合金成分按照规律变化外, 其他计算初始设定条件一致, 如相同的晶粒尺寸、相同的热处理固溶时效条件等。图 2 为通过 JMatPro 计算获得的 GH4738 合金中碳含量变化与抗拉强度之间的关系。由图 2 可见, 随着碳含量的

表 1 GH4738 高温合金主要成分

Table 1 Main chemical composition of GH4738 superalloy ($\omega/\%$)

C	Cr	Co	Mo	Ti	Al	Zr	B	Ni
0.02~0.1	18~21	12~15	3.5~5	2.75~3.25	1.2~1.6	0.02~0.08	0.003~0.01	Bal.

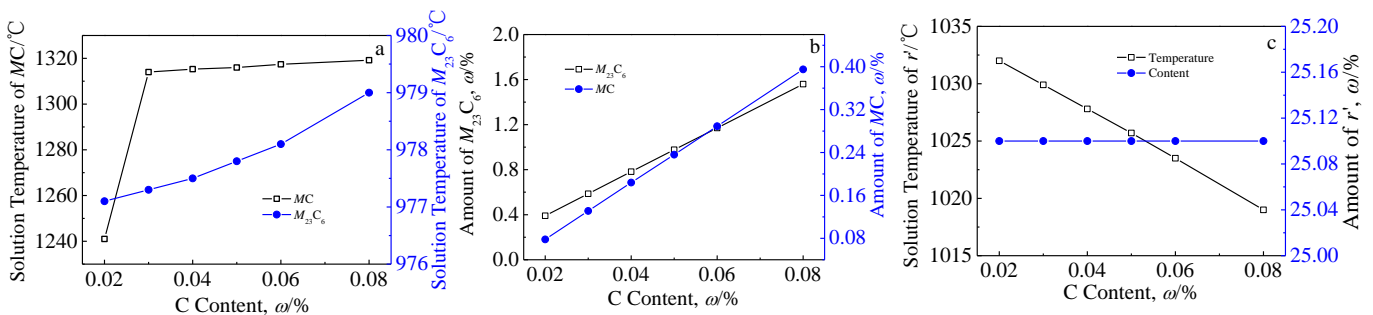


图 1 C 含量对 MC 及 $M_{23}C_6$ 碳化物的回溶温度、碳化物含量及 γ' 析出相的影响

Fig.1 Effect of C on the solution temperature of MC and $M_{23}C_6$ (a); carbide amount of MC and $M_{23}C_6$ (b); solution temperature of γ' and amount of γ' (c)

增加，合金抗拉强度会发生小幅度降低。该合金 C 含量由 0.02% 增加到 0.08% 过程中，其屈服强度由 1012 MPa 降低至 1006 MPa；其极限强度则由 1360 MPa 降低到 1355 MPa。由此可知，C 含量的变化对于合金抗拉强度的变化影响不明显。

2.2 Al, Ti 含量对 γ' 相回溶温度及其析出量的影响

在 GH4738 合金中 Al、Ti 元素为 γ' 相重要形成元素，其对合金中 γ' 相含量及力学性能的影响较大。图 3 为 Al、Ti 及 Al+Ti 含量对 γ' 的回溶温度及析出量的影响规律。由计算结果可以看出，随着 Al、Ti 和 Al+Ti 含量的增加，合金中 γ' 相含量及回溶温度都将发生不同程度的增加。如图 3a 所示，当 Al 含量由 1.2% 增加到 1.6% 时，合金中的 γ' 相回溶温度由 1016 °C 升高至 1042 °C，同时其析出最大量则由 23.2% 增加到 26.9%；如图 3b 所示，当 Ti 含量由 2.75% 增加到 3.25%，其 γ' 相回溶温度由 1015 °C 增加至 1043 °C，其最大析出量由 23.8% 增加至 26.4%；如图 3c 所示，当 Al+Ti 含量由 3.95% 增加到 4.85%，其 γ' 相回溶温度则由 1001 °C 升高至 1055 °C，其析出量范围由 22.2% 增加到 26.5%。总之，可以发现 Al、Ti 及 Al+Ti 含量的增加，都将促进 γ' 相回溶温度的提高和析出量的增加。

通过 JmatPro 软件计算获得 Al、Ti 和 Al+Ti 含量对拉伸力学性能的影响规律，如图 4 所示。由图 4a 所示，当 Al 含量由 1.2% 增加到 1.6%，合金的屈服强度及其极限强度分别增加了 53 MPa (由 984 到 1037 MPa) 和 41 MPa (由 1338 到 1379 MPa)；如图 4b 所示，Ti 含量由 2.75% 增加到 3.25%，合金的屈服强度及其极限强度分别增加了 80 MPa (由 972 到 1052 MPa) 和 66 MPa (由 1324 到 1390 MPa)；与此同时，如图 4c 所示，Al+Ti 总量由 3.85% 增加到 4.85%，合金的屈服强度和

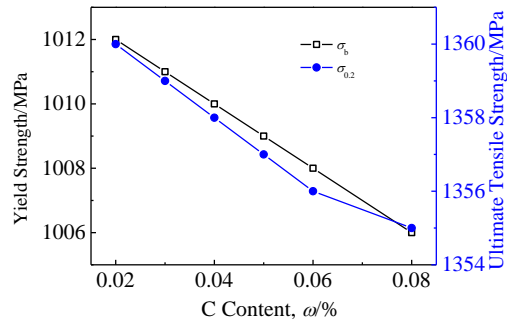


图 2 碳含量对拉伸性能的影响规律

Fig.2 Effect of C on tensile strength at room temperature by calculation

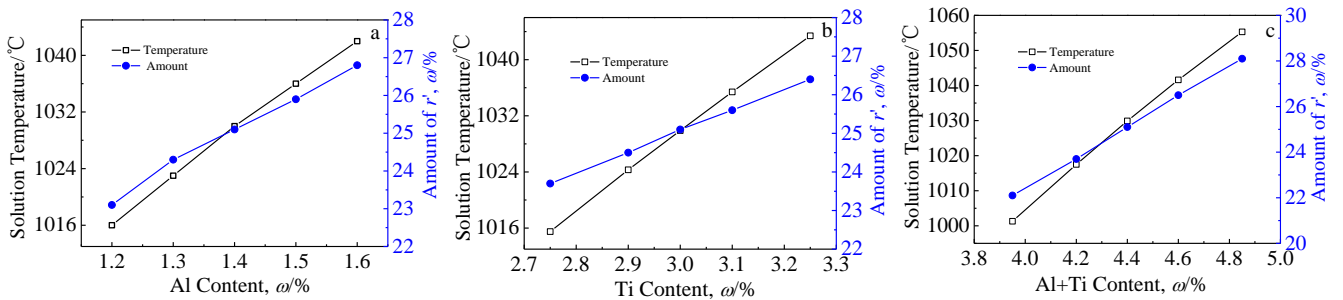


图 3 Al、Ti 及 Al+Ti 含量对合金中 γ' 相回溶温度与析出量的影响

Fig.3 Effect of Al (a), Ti (b) and Al+Ti (c) content on solution temperature and maximum amount of γ' phase

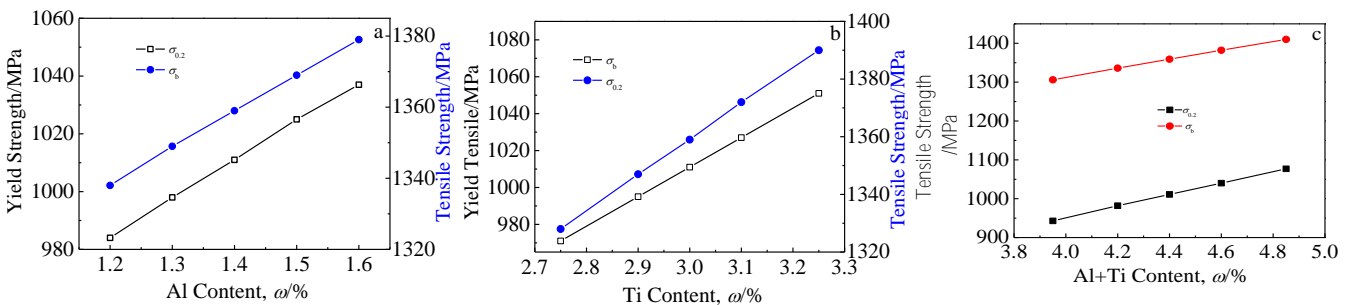


图 4 Al、Ti 量及 Al+Ti 量对合金拉伸性能的影响

Fig.4 Effect of Al (a), Ti (b) and Al + Ti (c) content on tensile property at room temperature by calculation

极限强度分别增加了 32 MPa (由 948 到 1080 MPa) 和 108 MPa (由 1302 到 1410 MPa)。总之, 无论是提高 Al, Ti 量还是增加 Al+Ti 量, 均能提高合金抗拉强度, 这就为合金设计提供了必要的理论参考。

2.3 Cr 含量对合金中 γ' 相回溶温度及析出量的影响

合金中 Cr 元素也是 GH4738 合金中的重要组成元素, 约占到 19.5%, 仅次于 Ni 含量。如图 5 所示, 合金中 Cr 元素对合金中 γ' 析出相回溶温度及析出量的影响。由图 5a 可见, Cr 含量由 18% 增加到 21%, 合金中 γ' 相的回溶温度 1017 °C 增加到 1041 °C; 但是从图 5a 中也可以看出, Cr 含量的增加对 γ' 相含量的变化几乎没有影响。图 5b 为 Cr 含量变化对合金屈服强度和极限强度的影响。可以发现, 合金中 Cr 含量的增加, 其屈服强度和极限强度分别增加了 20 MPa (由 998 到 1018 MPa) 和 49 MPa (由 1004 到 1053 MPa)。由此可知, 合金中 Cr 含量的增加, 可提高合金回溶温度, 同时也可增加合金抗拉强度。

3 讨论

3.1 合金中元素 C, Al 和 Ti 等元素对合金中 γ' 强化相的影响规律

将 C、Al、Ti 和 Cr 对 γ' 相析出量的影响规律, 绘制在图 6 中。可以看出, 在 GH4738 合金成分范围内, 影响合金析出相最明显的为 Al 元素, 其次为 Ti 元素,

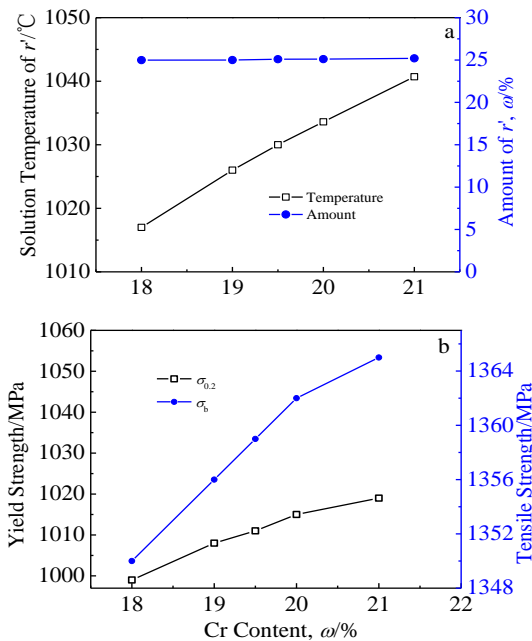


图 5 Cr 对合金中 γ' 相回溶温度与析出量及室温拉伸性能的影响
Fig.5 Effect of Cr on solution temperature, maximum content of γ' phase (a) and tensile property at room temperature (b)

C 元素几乎对 γ' 相的含量变化没有影响。由图 6 可以看出, 对 γ' 相的析出量的影响强弱依次为 Al>Ti>Cr; C 对 γ' 的析出量几乎没有影响。所以, 可以看出调控 Al 含量对 γ' 的析出量的影响最大。进而为了一定程度上降低碳化物量和提高 γ' 相的量, 宜采用提高 Al, Ti 含量, 同时适当降低 C 含量; 合金中 Al、Ti 含量的增加, 提高了合金 γ' 相回溶温度, 力学性能也获得了提高, 对于其成分上限的设定参考该合金 AMS5704 成分标准, Ti 不超过 3.25%, Al 不超过 1.6%, 进而对于以上模拟计算结果进行实际验证。

3.2 高强合金成分设计与验证

结合以上模拟计算结果, 通过调整 GH4738 合金中 Al(1.2~1.6), Ti(2.75~3.25), C(0.02-0.1)的合金成分, 冶炼了 7 炉合金, 如表 2 所示, 并测试了该系列合金的相关力学性能, 典型拉伸性能如图 7 所示。由图 7 可知, 前期计算结果 (图 4 所示) 与实际抗拉强度的力学性能测试结果基本吻合, 该合金 Al、Ti 含量变化强烈影响合金的抗拉强度, 故而采用了合金成分 Al 要高于 1.4%, 而 Ti 含量要高于 3.0%。

3.3 高强合金显微组织及相分析

鉴于合金强度与塑形具有反比关系^[9], 实验选取了合金 3 作为进一步研究的高强合金, 测定其合金析出相显微组织如图 8 所示。可知该合金在此 (1020 °C/4 h/AC + 845 °C/4 h/AC + 760 °C/4 h/AC, 注: AC 表示空冷) 热处理状态下, 呈现大小相间弥散分布的球状 γ' 析出相。图 9 给出了该合金晶界形貌。可见, 在晶界上断续分布着 Cr_{23}C_6 碳化物^[5,11], 该不连续、近似锯齿状碳化物有利于合金拉伸性能的提高。

对设计合金中的强化相主要为大小弥散分布的球状 γ' 相为主, 同时析出的碳化物断续分布, 其物理相分析结果显示其合金中 γ' 相质量分数占约 24.0%, 其点阵常数为 $a_0=0.357\sim 0.359$ nm, 其组成结构为

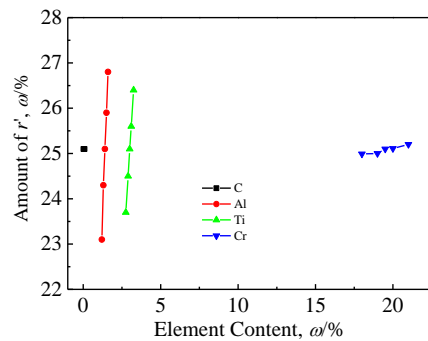


图 6 C, Al, Ti 和 Cr 对合金中 γ' 相析出量的影响
Fig.6 Effect of C, Al, Ti and Cr on maximum content of γ' phase prime

表 2 设计获得的 7 种合金成分

Table 2 Chemical composition of seven GH4738 superalloys ($\omega/\%$)

Alloy	C	Cr	Mo	Al	Ti	Co	S	P	Ni	Yield strength/MPa
1	0.040	19.50	4.21	1.21	3.10	14.0	0.001	0.007	Bal.	862
2	0.031	19.30	4.22	1.37	3.12	13.77	0.002	0.006	Bal.	965
3	0.048	19.70	4.25	1.40	3.12	13.9	0.001	0.008	Bal.	1089
4	0.024	19.13	4.18	1.46	3.13	13.68	0.001	0.008	Bal.	1111
5	0.035	19.55	4.23	1.37	2.74	14.10	0.001	0.007	Bal.	965
6	0.035	19.40	4.20	1.37	2.98	13.90	0.001	0.006	Bal.	1083
7	0.030	19.20	4.20	1.37	3.28	13.76	0.002	0.005	Bal.	1138

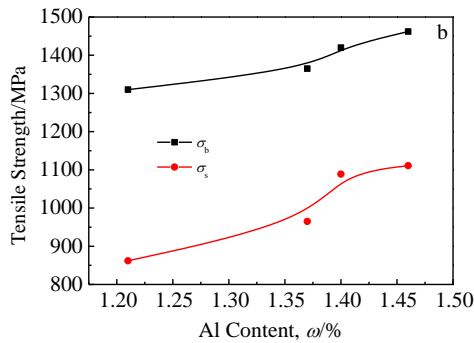
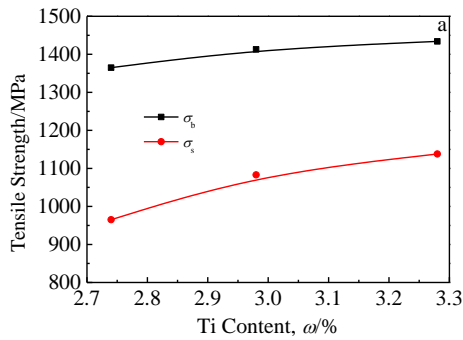


图 7 室温拉伸性能随实际 Al、Ti 含量的变化

Fig.7 Effect of Ti (a) and Al (b) content on tensile strength at room temperature

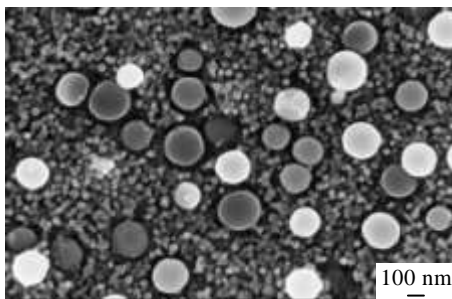


图 8 高强 GH4738 高温合金 γ' 强化相显微组织

Fig.8 Microstructure of γ' phases for high strength GH4738 superalloy

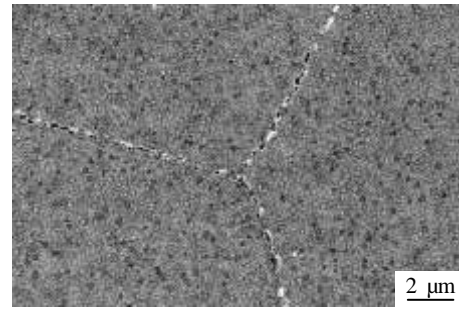


图 9 高强 GH4738 高温合金晶界形貌

Fig.9 Grain boundary morphology of high strength GH4738 superalloy

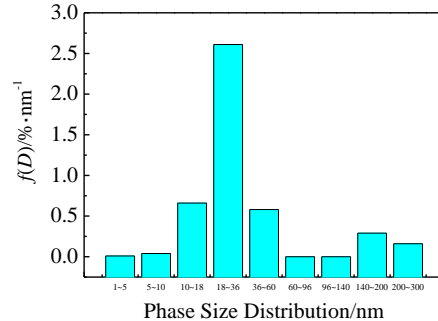


图 10 GH4738 高强合金中析出相粒度分布

Fig 10 Size distribution of precipitates in higher strength GH4738 superalloy

$(\text{Ni}_{0.9236}\text{Co}_{0.0415}\text{Fe}_{0.0025}\text{Cr}_{0.0322})_3(\text{Cr}_{0.0972}\text{Al}_{0.3585}\text{Ti}_{0.5059}\text{Mo}_{0.0366}\text{Co}_{0.0018})$, 需要特别指出的是, 相分析结果显示大小不一的 γ' 相具有同一种组成结构和晶格常数。

合金中的析出相粒度分布如图 10 所示。可以看出合金中 18~36 nm 粒子占比最大, 主要为 γ' 相粒子; 同时由于相分析结果中包括了所有析出相粒子, 故而粒径较大析出相也出现在分布图中。总之, 根据以上设计原则与验证, 测定了实际冶炼合金的室温、高温 540 °C 拉伸性能及持久 732 °C/550 MPa 条件下的力学

性能, 均达到了设计要求, 从而提出了高强 GH4738 高温合金成分设计原则及最佳的成分配方, 进而对国产最大型 GH4738 高温合金涡轮盘进行了制备, 并一举获得成功。

4 结 论

1) C 含量的增加, 可促进碳化物 $M_{23}C_6$ 及 MC 含量的增加以及回溶温度的提高, 但其几乎对 γ' 相含量的变化无影响。

2) Al、Ti 含量的增加, 都可以明显提高合金 γ' 相回溶温度及其析出量, 有利于合金强度的提高。

3) Cr 含量的增加, γ' 相的回溶温度提高, 但对于其析出量影响不大; 影响合金中 γ' 相回溶温度及析出量的合金元素依次为 Al, Ti, Cr。

4) 高强 GH4738 合金成分设计原则为适当降低 C 含量, 提高 Al、Ti 含量至合金成分范围高限。

5) 高强 GH4738 合金中 γ' 相质量分数占约 24.0%, 其点阵常数为 $a_0=0.357\sim 0.359$ nm, 其组成结构为 $(Ni_{0.9236}Co_{0.0415}Fe_{0.0025}Cr_{0.0322})_3(Cr_{0.0972}Al_{0.3585}Ti_{0.5059}Mo_{0.0366}Co_{0.0018})$ 。

参考文献 References

[1] Yao Zhihao, Li Linhan, Zhang Maicang *et al.* 8th International

Symposium on Superalloy 718 and Derivatives 2014[C]. Pennsylvania: TMS, 2014

[2] Cao Xiuli (曹秀丽). *Shanghai Metal* (上海金属)[J], 2012(6): 37

[3] Yu Qiuying (于秋颖), Dong Jianxin (董建新), Zhang Maicang (张麦仓). *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程) [J], 2010, 39(5): 857

[4] Masoumi F, Shahiari D, Cormier M *et al.* *Scientific Report*[J], 2016, 6: 1

[5] Yao Zhihao, Zhang Maicang, Dong Jianxin. *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2013, 44(7): 3084

[6] Hong Chengmiao (洪成淼), Yao Zhihao (姚志浩), Zhang Maicang(张麦仓) *et al.* *Journal of University of Science and Technology Beijing*(北京科技大学学报)[J], 2008, 30(9): 1018

[7] Yao Zhihao (姚志浩), Dong Jianxin (董建新), Zhang Maicang (张麦仓). *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2010, 39(9): 1565

[8] Wosik J, Dubiel B, Kruk A *et al.* *Materials Characterization*[J], 2001, 46(2-3): 119

[9] Chang K M, Liu X B. *Materials science and Engineering A*[J], 2001, 308(1-2): 1

[10] Pollock T M. *Nature Materials*[J], 2016, 15: 809

[11] Neumeier S, Freund L P, Göken M. *Scripta Materialia*[J], 2015, 109: 104

Composition Optimization Design and Verification for Nickel Based High Strength Superalloy GH4738

Yao Zhihao¹, Dong Jianxin¹, Zhang Maicang¹, Zhang Yufeng², Xie Wei³, Li Pengchuan⁴

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

(2. CNPC Bohai Petroleum Equipment Manufacturing Co., Ltd, Tianjin 300457, China)

(3. BaoSteel Special Metal Branch, Shanghai 200940, China)

(4. China National Erzhong Group Co., Ltd, Deyang 608013, China)

Abstract: High strength GH4738 superalloy is a candidate for oversized turbine disc in gas turbine field. Thermo-Calc and JMatPro software were used to optimize composition of the alloy combined with experiments. The effects of elements C, Al, Ti and Cr on phase precipitation and mechanical properties were calculated. Based on the calculated results, GH4738 superalloys with different contents of Al and Ti were fabricated, and tensile strength properties at room temperature were examined. The final elements of high strength GH4738 superalloy were determined and their phases were analyzed. The results show that increasing of C content can promote an increase in carbides ($M_{23}C_6$ and MC) amount and solution temperature, but it almost has no effect on the γ' phase amount. Elements Al, Ti can significantly increase solution temperature and its amount for γ' phase and improve strength of GH4738 alloy. Solution temperature of γ' phase increases with increasing of element Cr, but it hardly changes precipitating of γ' phase. The incidence order of elements on solution temperature and γ' phase amounts is Al>Ti>Cr. The design principle of GH4738 superalloy is to reduce the C content, and improve Al, Ti content to the upper limit in the range of the alloy. The amount of γ' phase in GH4738 super alloy is about 24.0%, its lattice constant $a_0=0.357\sim 0.359$ nm, and its composition is $(Ni_{0.9236}Co_{0.0415}Fe_{0.0025}Cr_{0.0322})_3(Cr_{0.0972}Al_{0.3585}Ti_{0.5059}Mo_{0.0366}Co_{0.0018})$. The results provide a design idea for large sized high strength GH4738 superalloy turbine disk.

Key words: high strength GH4738 superalloy; turbine disk; composition design; mechanical properties; phases analysis

Corresponding author: Yao Zhihao, Ph. D., Associate Professor, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, P. R. China, Tel: 0086-10-62332884, E-mail: zhihao-yao@163.com