

## Al 含量对 K418 合金的 TCP 相析出规律的影响

王 璞<sup>1</sup>, 罗俊义<sup>1</sup>, 刘宗利<sup>2</sup>

(1. 安泰科技股份有限公司精细金属制品分公司, 北京 101318; 2. 舍弗勒贸易(上海)有限公司  
北京办事处, 北京 100020)

**摘 要:**利用 Thermo-Calc 软件计算得出 Al 含量对 K418 合金的 TCP 相析出规律的影响。结果表明:K418 合金析出相为 MC 相、 $M_{23}C_6$  相、 $\gamma$  相、 $\gamma'$  相、 $\sigma$  相、 $\mu$  相、 $\alpha$ -Cr 相、 $M_3B_2$  相和液相。Al 质量分数在 6.5%~5.5% 成分范围内,碳化物、硼化物、液相线的含量变化较小,有少量  $\alpha$ -Cr 相析出。随 Al 含量减少,TCP 相析出含量而减少且呈阶段性变化,在 710 °C 以下以  $\mu$  相析出为主;在 710 °C 和 840 °C 之间以  $\sigma$  相析出为主。降低  $\sigma$  相析出含量,Al 质量分数建议控制在 6.0%~5.5% 范围之内。降低  $\mu$  相和 TCP 相析出含量,Al 含量建议接近下限。综合考虑,为减少 K418 合金 TCP 相析出,Al 质量分数建议尽量接近下限 5.5%,而实际生产中制定 Al 含量的目标值还需考虑合金使用强度、冶炼烧损量和脱氧消耗量。

**关键词:**Thermo-Calc 软件;K418 合金;Al 含量;TCP 相;析出规律

**文献标志码:**A **文章编号:**1001-0777(2013)03-0009-05

## Effect of Al Content on Precipitation Regularity of TCP Phase in K418 Alloy

WANG Pu<sup>1</sup>, LUO Jun-yi<sup>1</sup>, LIU Zong-li<sup>2</sup>

(1. Special Metal Branch, Advanced Technology and Materials Co., Ltd., Inc., Beijing 101318, China;  
2. Beijing Branch, Schaeffler Trading (Shanghai) Co., Ltd., Beijing 100020, China)

**Abstract:** The effect of Al content on the precipitation regularity of TCP phase was studied by the calculation results of Thermo-Calc software. The results indicated that, the precipitation phase of K418 alloy was MC phase,  $M_{23}C_6$  phase,  $\gamma$  phase,  $\gamma'$  phase,  $\sigma$  phase,  $\mu$  phase,  $\alpha$ -Cr phase,  $M_3B_2$  phase and liquid phase. The content of carbide, boride and liquid phase was almost no change and the content of  $\alpha$ -Cr phase was little as the Al content was between 6.5% and 5.5%. The precipitation content of TCP phase was decreased and presented stage variation as the Al content decreased. The content of TCP phase was mainly precipitated  $\mu$  phase below 710 °C and  $\sigma$  phase between 710 °C and 840 °C. The  $\sigma$  phase disappeared as the Al content was between 6.0% and 5.5%. The content of  $\mu$  phase and TCP phase was little as the Al content was close to 5.5%. For decreasing TCP phase content of K418 alloy, the Al content should be as close as to the minimum Al content of 5.5%. But strength, melting loss, and deoxidized amount should also be considered for the determination of the target value of Al element.

**Key words:** Thermo-Calc software; K418 alloy; Al content; TCP phase; precipitation regularity

相图热力学计算是探索多元合金体系中平衡相构成的有效途径。热力学计算可以用来预测合金在各个温度的平衡相、亚稳相以及它们的数量、成分、物理性能和力学性能。结合合金热力学计算的数据库,一些商业化的软件(如 Thermo-Calc、JMatPro、PANDAT、FactSage 和 PMLFKT)在国外已经得到有效地使用。中国主要使用 Thermo-Calc 软件对镍基高温合金进行热力学平衡相计算,这些研究工作已有报道<sup>[1-3]</sup>。

高温合金中发现的 TCP 相有  $\sigma$  相、 $\mu$  相、Laves 等相。高温合金在使用过程中如果出现大量的片状

TCP 相,往往造成力学性能的严重降低,威胁着航空发动机和燃气轮机动力设备的安全使用。有研究发现 Al 含量达到某一数值后,可促进 TCP 相析出,使裂纹易于成核和扩展,降低高温合金的持久寿命<sup>[4]</sup>。因此本文利用 Thermo-Calc 软件计算相图,调整 Al 含量,计算 K418 合金中 TCP 相的析出规律,减少其析出相含量,确定最佳的高温合金冶炼目标值,提高合金性能和使用稳定性。

### 1 试验材料及方法

将 K418 合金的成分作为 Thermo-Calc 软件的

输入条件,假定其他成分含量保持在中限,改变 Al 含量,分别计算 K418 合金不同 Al 含量平衡相图,

总结析出相及其含量的变化。K418 合金化学成分如表 1 所示。

表 1 K418 合金化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of K418 Alloy

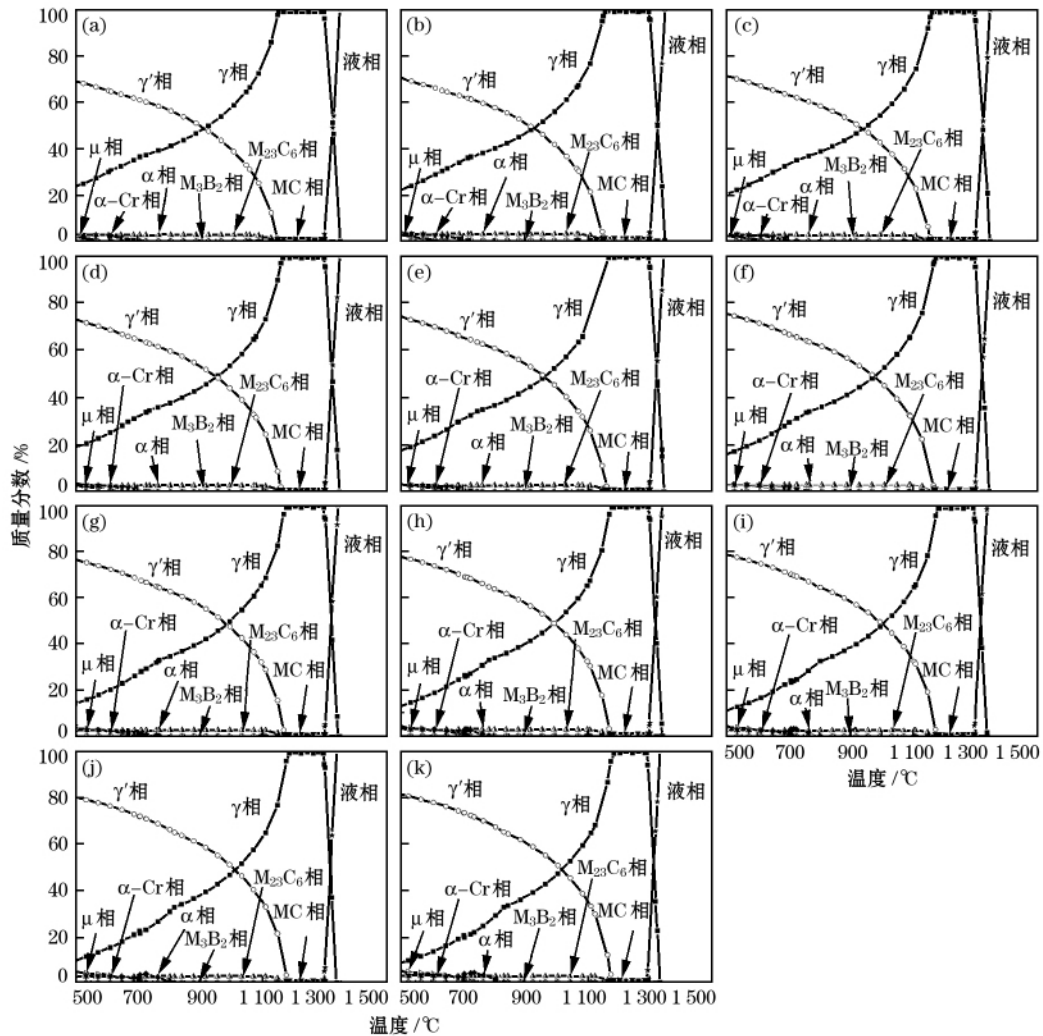
| 元素成分 | C         | Cr          | Mo        | Al        | Ti        | Nb        | B           | Zr        |
|------|-----------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------|-----------|
| 质量分数 | 0.08~0.20 | 12.00~14.00 | 3.80~5.20 | 5.50~6.50 | 0.50~1.00 | 1.80~2.80 | 0.005~0.015 | 0.05~0.15 |
| 元素成分 | Fe        | Si          | Mn        | Cu        | Co        | P         | S           | Ni        |
| 质量分数 | ≤2.5      | ≤0.5        | ≤0.25     | ≤0.5      | ≤1        | ≤0.015    | ≤0.015      | Bal.      |

## 2 试验结果及分析

Thermal-Calc 软件计算 K418 合金随 Al 含量变化的相图见图 1, Al 质量分数分别为 5.5%、5.6%、5.7%、5.8%、5.9%、6.0%、6.1%、6.2%、6.3%、6.4%

和 6.5%。可得出以下内容:

1) 析出相种类。计算得出 K418 合金析出相为 MC 相、 $M_{23}C_6$  相、 $\gamma$  相、 $\gamma'$  相、 $\sigma$  相、 $\mu$  相、 $\alpha$ -Cr 相、 $M_3B_2$  相和液相。除  $\sigma$  相外无析出相种类变化,即当 Al 质量分数在 6.0%~5.5%,无  $\sigma$  相析出。



(a) 5.5%; (b) 5.6%; (c) 5.7%; (d) 5.8%; (e) 5.9%; (f) 6.0%; (g) 6.1%;  
(h) 6.2%; (i) 6.3%; (j) 6.4%; (k) 6.5%。

图 1 K418 合金不同 Al 质量分数的 Thermal-Calc 计算相图

Fig. 1 Thermal-Calc calculation phase diagrams of K418 alloy with different Al contents

2) 析出相析出及回溶温度。在冷却过程中,各析出相析出温度和回溶温度不同,即该相开始出现和消失的温度不同。比如 MC 相和  $M_{23}C_6$  相在  $1320\text{ }^{\circ}\text{C}$  开始析出,达到峰值含量后不再析出。不同 Al 质量分数计算  $\sigma$  相在  $705\sim 710\text{ }^{\circ}\text{C}$  范围内回溶。

3) 析出相含量。计算相图随温度变化的各析出相含量发生变化,可直接获得某一温度下各析出相的含量。比如当 Al 质量分数在  $6.0\%$  时, $750\text{ }^{\circ}\text{C}$  时 K418 合金析出相为  $\gamma$  相、 $\gamma'$  相、 $M_{23}C_6$  相和  $M_3B_2$  相。随着温度变化,合金中各温度析出相的种类不同。

### 3 讨论

#### 3.1 Al 含量变化对 $\sigma$ 相的影响

镍基高温合金中  $\sigma$  相一般为  $(Cr, Mo)(Ni, Co)$  型。 $\sigma$  相在高温合金中往往呈针(片)状分布于晶内,呈颗粒状或连续膜状分布于晶界。 $\sigma$  相从奥氏体基体中析出,析出温度范围一般为  $750\sim 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,析出峰温度通常为  $800\sim 850\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右<sup>[5]</sup>。图 2 为 Thermal-Calc 软件计算 K418 合金  $\sigma$  相随 Al 含量变化的析出规律,随 Al 质量分数从  $6.5\%$  降至  $6.0\%$ , $\sigma$  相析出温度逐渐降低,从  $833\text{ }^{\circ}\text{C}$  降至  $760\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。随 Al 含量不同, $\sigma$  相回溶温度变化不大,为  $705\text{ }^{\circ}\text{C}$  至  $710\text{ }^{\circ}\text{C}$  之间。同时随 Al 含量减少, $\sigma$  相析出含量不断减少。当 Al 质量分数降低至  $6.1\%$  时, $\sigma$  相析出含量明显减少。当 Al 质量分数降低至  $6.0\%$  或  $6.0\%$  以下时,无  $\sigma$  相析出。由于  $\sigma$  相中含有大量 Cr、Mo、W 等难熔金属元素, $\sigma$  相的析出,使合金基体中这些元素的含量降低,削弱固溶强化作用。 $\sigma$  相的析出数量越多,这种弱化作用越大,所以当  $\sigma$  相的含量达到某一数量时,无论  $\sigma$  相的形态如何,也不管分布在晶

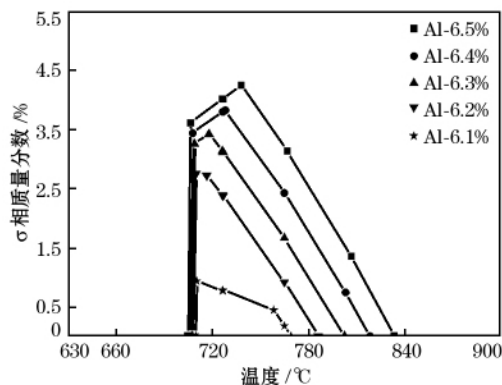


图2 不同 Al 含量 K418 合金  $\sigma$  相的析出规律  
Fig. 2 Precipitation regularity of phase of K418 alloy with different Al contents

界或晶内,都会对合金性能造成有害影响。在实际高温合金生产过程中,希望降低  $\sigma$  相析出含量,Al 质量分数建议控制在  $6.0\%\sim 5.5\%$  的范围之内,但同时应考虑冶炼过程 Al 含量的脱氧作用和烧损量。

#### 3.2 Al 含量变化对 $\mu$ 相的影响

$\mu$  相的析出峰温度一般在  $900\sim 950\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $\mu$  相晶体结构与  $M_6C$  相近,所以  $\mu$  相往往在  $M_6C$  上形核<sup>[5]</sup>。与  $\sigma$  相一样,针(片)状  $\mu$  相是裂纹的形核处与扩展通道。 $\mu$  相的存在削弱基体固溶强化和沉淀强化作用,明显降低持久性能。图 3 为 K418 合金  $\mu$  相随 Al 含量变化的析出规律,随 Al 含量降低, $\mu$  相析出温度呈现先增加后降低的趋势。当 Al 质量分数  $6.5\%$  降至  $6.2\%$ , $\mu$  相析出温度几乎相同,在  $707\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右;当 Al 质量分数从  $6.1\%$  降至  $5.5\%$ , $\mu$  相析出温度从  $738\text{ }^{\circ}\text{C}$  降低至  $707\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。同时随 Al 质量分数  $6.5\%$  降至  $5.5\%$ , $\mu$  相析出质量分数逐渐降低且质量分数趋于  $3.0\%$ 。只要温度和时间适宜, $\mu$  相析出是不可避免的。如需降低 K418 合金的  $\mu$  相析出含量,Al 质量分数建议尽量接近成分下限  $5.5\%$ 。

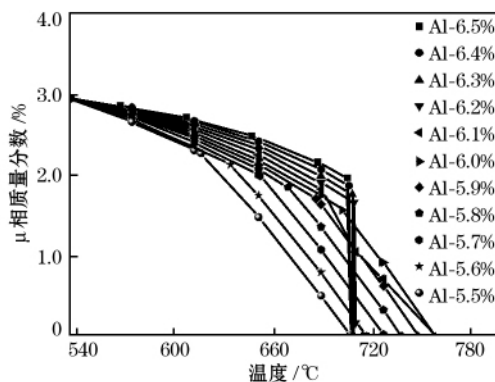


图3 不同 Al 含量 K418 合金  $\mu$  相的析出规律  
Fig. 3 Precipitation regularity of  $\mu$  phase of K418 alloy with different Al contents

#### 3.3 Al 含量变化对 TCP 相的影响

根据 Thermal-Calc 软件计算相图结果,K418 合金 TCP 相主要为  $\sigma$  相和  $\mu$  相,没有 Laves 相析出。K418 合金 TCP 相含量为  $\sigma$  相和  $\mu$  相含量之和,其含量随 Al 变化的析出规律如图 4 所示,随 Al 质量分数  $6.5\%$  降至  $5.5\%$ ,TCP 相析出温度逐渐降低,从  $833\text{ }^{\circ}\text{C}$  降至  $707\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。同时随 Al 质量分数  $6.5\%$  降至  $5.5\%$ ,TCP 相析出含量呈阶段性变化,在  $710\text{ }^{\circ}\text{C}$  以下,TCP 相含量以  $\mu$  相析出为主,其含量变化规律  $\mu$  相析出规律相同;在  $710\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $840\text{ }^{\circ}\text{C}$

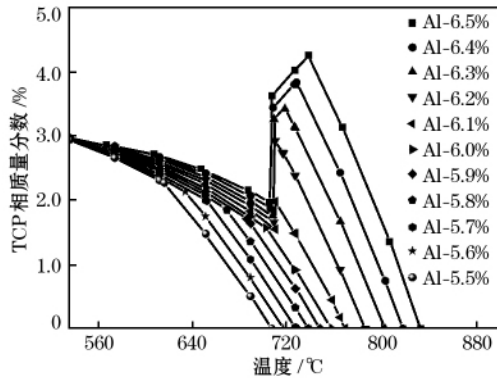


图 4 不同 Al 含量 K418 合金 TCP 相的析出规律

Fig. 4 Precipitation regularity of TCP phase of K418 alloy with different Al contents

之间, TCP 相含量以  $\sigma$  相析出为主, 其含量变化规律  $\sigma$  相析出规律相同。随 Al 含量和温度不断降低, TCP 相析出含量差别逐渐减小, 趋于 3.0% 左右。因此, 如需降低 K418 合金 TCP 相析出含量, Al 质量分数建议尽量接近成分下限 5.5%。在实际合金生产时还应根据实际设备的情况, 考虑 Al 含量的烧损量和脱氧消耗量。

### 3.4 Al 含量变化对其他析出相的影响

K418 合金随 Al 含量变化的各析出相变化规律见图 5。

1) 液相线温度。随 Al 质量分数的降低液相线温度增加, 相差 12 °C, 在实际冶炼生产中影响不大。

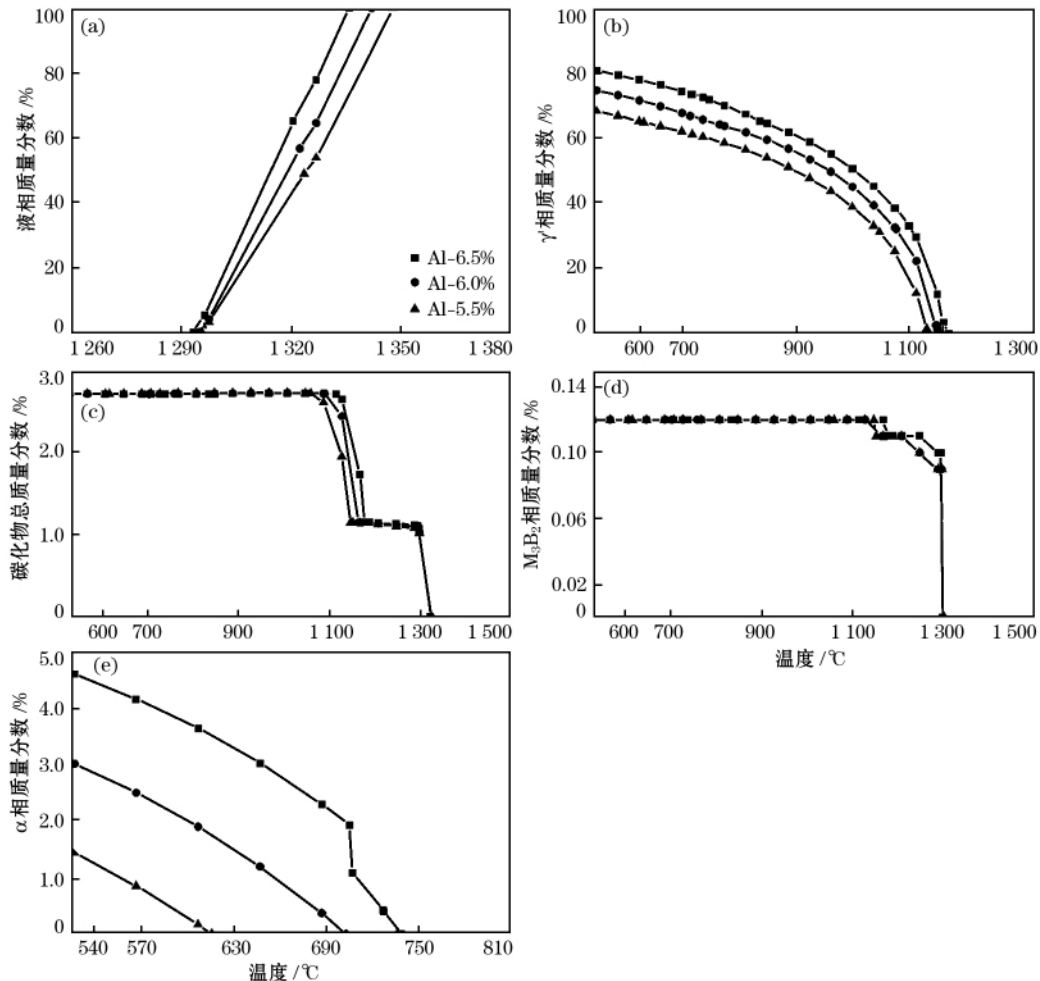
(a) 液相; (b)  $\gamma'$  相; (c) 碳化物总含量; (d)  $M_3B_2$  相; (e)  $\alpha$ -Cr 相。

图 5 不同 Al 含量 K418 合金其他析出相的析出规律

Fig. 5 Precipitation regularity of other precipitation phases of K418 alloy with different Al contents

2)  $\gamma'$  相含量。随 Al 含量降低,  $\gamma'$  相含量的析出含量明显减少。但由于 Al 是  $\gamma'$  相的组成元素, Al 含量过低将会导致基体强度降低, 影响材料的使

用性能。随温度升高,  $\gamma'$  相析出含量逐渐减少; 当温度达到 1200 °C 以上时  $\gamma'$  相发生回溶。

3) 碳化物。根据 Thermal-Calc 计算结果,

K418 合金碳化物主要为 MC 相和  $M_{23}C_6$  相。随 Al 质量分数 6.5% 降至 5.5%, MC 相、 $M_{23}C_6$  相和碳化物总含量变化不大。

4) 硼化物。根据 Thermal-Calc 计算结果, K418 合金硼化物主要为  $M_3B_2$  相。B 是强烈枝晶间偏析元素, 富集在枝晶间, 最终形成  $\gamma + M_3B_2$  共晶组织。随 Al 质量分数由 6.5% 降至 5.5%,  $M_3B_2$  相含量变化不大。

5)  $\alpha$ -Cr 相。 $\alpha$ -Cr 相对合金力学性能的影响取决于合金基体成分和热处理状态等因素<sup>[6]</sup>。随 Al 质量分数从 6.5% 降至 5.5%,  $\alpha$ -Cr 相析出温度逐渐降低, 从 738 °C 降至 616 °C。同时随 Al 含量降低,  $\alpha$ -Cr 相析出含量明显减少, 析出量最大值和最小值分别为 4.6% 和 1.5%。热力学计算仅得出该相析出的趋势, 在实际冷却过程中能否析出该相还需考虑动力学的因素。

本方法可用于计算 K418 合金中其他成分含量对 TCP 相的影响, 一方面可用于指导高温合金冶炼目标值的制定, 但同时应根据设备的使用情况, 实际考虑成分含量的冶炼烧损量和脱氧损耗量。另一方面从减少有害相析出的角度, 更合理地配置各成分含量的平衡, 同时可减少贵金属的使用量, 达到较好的降低成本的效果。

## 4 结论

1) 计算得出 K418 合金析出相为 MC 相、 $M_{23}C_6$  相、 $\gamma$  相、 $\gamma'$  相、 $\sigma$  相、 $\mu$  相、 $\alpha$ -Cr 相、 $M_3B_2$  相和液相。随

Al 质量分数由 6.5% 降至 5.5%, 碳化物、硼化物、液相线的含量变化较小, 有少量  $\alpha$ -Cr 相析出。

2) 随 Al 质量分数由 6.5% 降至 5.5%, TCP 相析出含量为阶段性变化, 在 710 °C 以下以  $\mu$  相析出为主, 在 710 °C 和 840 °C 之间 TCP 相含量以  $\sigma$  相析出为主。随 Al 含量和温度不断降低, TCP 相析出含量差别逐渐减小, 趋于 3.0% 左右。

3) 为降低 K418 合金  $\sigma$  相析出含量, Al 质量分数建议控制在 6.0%~5.5%; 降低  $\mu$  相和 TCP 相析出含量, Al 质量分数建议接近下限 5.5%。综合考虑, 为减少 K418 合金 TCP 相析出, Al 质量分数建议尽量接近下限 5.5%, 而实际生产中制定 K418 合金 Al 含量的目标值还需考虑合金使用强度、冶炼烧损量、脱氧消耗量。

## 参考文献:

- [1] 洪成森, 姚志浩, 张麦仓, 等. Waspaloy 合金碳化物和  $\gamma$  相析出规律的热力学计算[J]. 北京科技大学学报, 2008, 30(9): 1018.
- [2] 张义文, 王福明, 胡本英. 铝对 FGH97 合金平衡相影响的评估[J]. 北京科技大学学报, 2011, 33(8): 978.
- [3] 王衣, 孙锋, 董显平, 等. 新型 Ni-Co 基高温合金中平衡析出相的热力学研究[J]. 金属学报, 2010, 46(3): 334.
- [4] 肖耀天, 郭建亭, 纪士辰, 等. 铝对铁基高温合金时效组织及热强性影响的研究[J]. 辽宁冶金, 1981, (3): 43.
- [5] 郭建亭. 高温合金材料学(上册)[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [6] 郭建亭. 铝和钛对一种 35 镍 15 铬型铁基高温合金组织结构和力学性能的影响[J]. 金属学报, 1978, 14(3): 227.