

# 真空感应重熔 GH3625 合金纯净化研究

丁雨田, 王伟, 李海峰, 郭廷彪, 胡勇, 刘建军

(兰州理工大学 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 为进一步降低 GH3625 母合金中的氧、氮、硫含量, 分别进行了高真空不加钙和高真空加钙 2 种工艺下的真空感应重熔实验, 研究了高真空感应重熔精炼对合金成分和去除杂质元素氧、氮、硫的作用。结果表明: 高真空感应重熔元素挥发烧损和富化均控制在标准成分范围; 单纯高真空感应重熔时, 合金中的氧通过 C-O 反应脱除, 可脱氧至 10  $\mu\text{g/g}$ , 氮分压降低使氮含量脱至 70  $\mu\text{g/g}$ , 但在去硫方面无明显作用; 高真空加 0.5% 钙作净化剂重熔时, Ca-O 反应以及 Ca 与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  坩埚内壁反应可实现深度脱氧, 通过 Ca-S 反应使合金中硫含量显著降低, 然而氮含量降低程度有限, 其含量远高于氮在 GH3625 合金中的溶解度。采用  $\text{Al}_2\text{O}_3$  坩埚, 选择高真空熔炼工艺及适量钙的加入, 可使氧、氮、硫含量分别降低到 6、60、9  $\mu\text{g/g}$ 。

**关键词:** GH3625; 纯净化; 真空感应重熔

**中图分类号:** TG132.3<sup>+</sup>2; TF133<sup>+</sup>.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2018)02-0687-05

镍基高温合金广泛应用于航空航天、石油化工、船舶舰艇、核电站等重工业领域, 要求其具有极高的物理、化学性能。而有害杂质元素严重影响其各项性能指标, 其中以氧、氮、硫为主要有害杂质元素。合金中即使含有微量的氧、氮、硫, 也会对合金性能产生极其不利的影响。例如: 对 M17F 合金的研究表明, 将氧和硫含量均从 20  $\mu\text{g/g}$  降至 10  $\mu\text{g/g}$  以下, 材料的高温持久性能提高了 90%<sup>[1]</sup>; GH3625 合金最初由于氮含量过高造成严重的薄板开裂问题, 现代高温合金中可接受的氮含量在 50  $\mu\text{g/g}$  左右<sup>[2,3]</sup>; 在 GH690 合金中要求硫含量必须降低到 10  $\mu\text{g/g}$  左右, 否则, 严重影响合金的热加工塑性, 造成热加工困难<sup>[4]</sup>。因此高温合金中氧、氮、硫含量越低越好。

由于高温合金自身的特点, 其熔炼工艺普遍采用真空感应熔炼 (VIM)。关于 VIM 的大量研究表明, 采用 CaO 坩埚加净化剂对高温合金的高纯净化熔炼具有明显的效果<sup>[5-8]</sup>。但由于 CaO 坩埚烧结困难, 加工成本高昂, 暴露空气中易吸水, 因此不适于工业普遍应用。本工作选择应用更为普遍的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  坩埚进行实验。众所周知, 真空度对感应熔炼具有重要意义; Ca 具有很强的脱氧、脱硫能力, 且镍基合金中有微量 Ca (0.001%~0.002%) 残留时, 可改善锻造镍基合金的塑性和持久强度<sup>[9]</sup>。因此本实验主要研究单纯高真空

感应重熔和高真空加钙作净化剂重熔 GH3625 母合金去除氧、氮、硫的作用。

## 1 实验

实验材料为采用 200 kg 真空感应熔炼设备在真空度 13 Pa 左右时制备的 GH3625 母合金原电极, 编号为 0#。在原电极同一部位切取 2 份 400 g 母合金小块试样, 采用 500 g 实验室小型真空感应熔炼设备在高真空度下 (0.1 Pa) 进行重熔实验。实验分别为高真空不加钙和高真空加钙的真空感应重熔, 具体工艺参数见表 1。得到的重熔合金锭分别编号为 1# 和 2#。重熔耐火材料为高纯刚玉坩埚, 其理化指标为:  $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 99\%$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \leq 0.1\%$ ,  $\text{SiO}_2 \leq 0.2\%$  (质量分数), 体积密度  $\geq 3.80 \text{ g/cm}^3$ , 气孔率  $< 1\%$ , 最高使用温度 1800  $^\circ\text{C}$ 。重熔后试样经切削加工成  $\Phi 5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$  的棒料, 表面打磨光亮, 在丙酮中进行超声波清洗后, 采用美国 LECO 公司生产的 ONH-836 氧氮氢联测仪测定 O、

表 1 GH3625 合金真空感应重熔工艺  
Table 1 Remelting experimental parameters

Experiment No.	Vacuum/ Pa	Temperature/ $^\circ\text{C}$	Holding time/min	Scavenger Ca content, $\omega/\%$
1	0.1	1550	3	-
2	0.1	1550	3	0.5

收稿日期: 2017-02-24

基金项目: 甘肃省重大科技专项 (145RTSA004)

作者简介: 丁雨田, 男, 1962 年生, 博士, 教授, 兰州理工大学省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050, 电话: 0931-2973561, E-mail: dingyutian@126.com

N 的含量,采用 CS-230 碳硫分析仪测定 S 含量。熔炼温度采用外置红外测温仪测定。

## 2 结果与讨论

### 2.1 真空感应重熔对合金化学成分的影响

特定合金采用真空感应熔炼时,合适的真空度既能保证杂质元素的有效脱除,又不致使有益合金元素挥发损失严重。表 2 为原电极和经工艺 1、2 重熔后合金锭的化学成分。由表 2 可知:元素 C、Cr、Al、Fe 有略微的烧损。C 由于高真空作用下强烈的 C-O 反应氧化损失。1600 °C 时纯元素 Al、Cr、Fe 的蒸气压分别为 266、22.7、5.2 Pa,虽然真空感应熔炼时合金元素的蒸气压低于熔炼温度下纯元素的蒸气压,但在高温高真空的作用下这些元素仍然具有很强的挥发性,因此高真空下与 C 不同,Al、Cr、Fe 皆因挥发而损失。由于这些元素的损失使高熔点难挥发元素 Mo、Nb 在合金中富化,质量分数有所升高。但各合金元素含量均在标准成分范围内,因此 0.1 Pa 左右高真空下重熔 GH3625 母合金是可行的。

### 2.2 重熔合金锭中的 O、N、S 含量

表 3 为 GH3625 合金原电极和经工艺 1、工艺 2 重熔后合金锭中气体元素和 S 含量的检测结果。由表 3 可以看出,单纯的高真空工艺具有良好的脱 O 效果,去 N 作用次之,但在脱 S 方面无明显作用。O 含量从 17 μg/g 降低至 10 μg/g, N 含量从 100 μg/g 减少到 70 μg/g, S 含量仅从 24 μg/g 下降到 20 μg/g, O、N、S 的脱除率分别为 41%, 30%, 17%。结合表 2 发现,重熔后合金中 C、O 含量均明显降低,可见高的真空度会加剧合金液中 C-O 反应的进行,有利于合金中 O 的脱除。另一方面,高真空作用下使合金重熔过程中气体杂质的气相分压降低,从而降低气体杂质在合金熔体中的溶解度,有利于 N 的脱除。工艺 2 在高真空

下合金熔清后向熔体中加入 0.5%Ca 进一步降低了 O、N、S 杂质元素的含量,尤其在去 O、S 方面效果显著。高真空加钙重熔后, O、N、S 含量分别降低至 6, 60, 9 μg/g, 与原始电极棒相比脱除率分别达到 65%, 40%, 63%。当原电极熔清后加入 Ca 时,液态金属、Ca、炉衬材料之间发生一系列物理化学反应,从而使合金锭中的 O、S 等有害杂质含量迅速降低,而这种表面活性元素脱除的同时带动气体杂质 N 元素的去除。

### 2.3 去除氧、硫、氮杂质的简单热力学计算

#### 2.3.1 GH3625 合金熔体中 C-O 和 Ca-O 反应的平衡关系

众所周知, C 在高真空时具有极强的脱氧能力。由于 GH3625 母合金中含有 0.04%C, 在高真空感应重熔过程中不可避免地发生 C-O 反应。镍合金液中其反应方程式为:



式(1)的标准反应吉布斯自由能为<sup>[10]</sup>:

$$\Delta G_r^0 = -67742 - 39.75 T \quad (2)$$

根据等温方程有:

$$\Delta G_r^0 = -RT \ln K \quad (3)$$

由式(2)、(3)得到平衡常数与温度的关系:

$$\lg K_{CO} = \frac{3538}{T} + 2.076 \quad (4)$$

由式(4)得到 1600 °C 时  $K_{CO}=9200$ 。

反应式(1)的平衡常数为:

$$K_{CO} = \frac{P_{CO}}{f_C[C\%]f_O[O\%]} \quad (5)$$

式(5)中,  $P_{CO}$  为真空感应炉内 CO 分压,  $f_C$ 、 $f_O$  分别为 C 和 O 的活度系数,  $[C\%]$ 、 $[O\%]$  分别为 C 和 O 的质量分数。

由多元系溶液中活度系数的 Wangner 模型有<sup>[11]</sup>:

$$\lg f_i = \sum_{j=2}^n e_i^j [j\%] + \sum_{j=2}^n \gamma_i^j [j\%]^2 \quad (6)$$

式中,  $f_i$  为合金液中  $i$  元素的活度系数,  $e_i^j$  为  $j$  元素对  $i$  元素的一次相互作用系数,  $\gamma_i^j$  为  $j$  元素对  $i$  元素的二次相互作用系数,  $[j\%]$  为  $j$  元素的质量分数。

1600 °C 时合金元素间的相互作用系数值见表 4。

表 2 原电极和重熔 GH3625 合金锭的化学成分

Sample No.	C	Cr	Mo	Nb	Fe	Al	Ti	Ni
0#	0.04	20.60	8.69	3.44	4.53	0.25	0.22	Bal.
1#	0.03	20.43	8.75	3.54	4.39	0.15	0.23	Bal.
2#	0.03	20.45	8.73	3.53	4.39	0.18	0.23	Bal.

表 3 原电极和重熔 GH3625 合金锭中 O、N、S 含量

Table 3 Oxygen, nitrogen and sulphur contents of primary electrode and remelted alloy GH3625 (μg/g)

Sample No.	O	N	S
0#	17	100	24
1#	10	70	20
2#	6	60	9

表 4 1600 °C 时合金元素  $j$  对  $i$  的相互作用系数  $e_i^j$  与  $\gamma_i^j$ <sup>[13-16]</sup>  
Table 4 Interaction coefficients of alloy elements at 1600 °C<sup>[13-16]</sup>

Alloy element	Cr	Mo	Nb	Fe	Al	Ti	C	O
$e_C^j$	-0.024*	-0.0038*	-0.06*		0.043*	-0.038*		
$e_O^j$	-0.231	-0.024	-0.14*		-1.060	-0.60*	-21.6	
$\gamma_O^j$	0.009				0.270		111.8	
$e_{Ca}^j$								-3060
$\gamma_{Ca}^j$								8.47×10 <sup>5</sup>
$e_S^j$	0.030	0.053	-0.013*		0.133	-0.072*		
$e_N^j$	-0.101	-0.043	-0.072	-0.021	0.0	-0.21	0.09	
$\gamma_N^j$	0.0021	0.000267						

\* Values in liquid ferroalloy

由于缺少镍合金液中合金元素之间的相互作用系数数据，熔炼温度下合金元素间的相互作用系数值近似取 1600 °C 时的数值，部分数据用铁合金液中的相关数据代替。主要讨论低氧区的 C-O 反应，氧对活度系数的贡献很小而忽略不计。根据已有数据，利用式(6)对活度系数  $f_C$ 、 $f_O$  进行估算得： $f_C=0.185$ ， $f_O=9.74 \times 10^{-3}$ 。

由式(5)得：

$$m = [C\%][O\%] = \frac{P_{CO}}{K_{CO}f_Cf_O} \quad (7)$$

式(7)中， $m$  为脱氧常数，是当合金液的温度和脱氧元素浓度一定时，与脱氧元素相平衡时合金液中的含氧量，是衡量元素脱氧能力强弱的指标之一。由式(7)得到真空度为 0.1, 13, 100, 101 325 Pa 时的  $m$  值，计算结果如图 1 所示，并在图中加入相应真空度下的实验数据。从图 1 可以看出，在真空度 13 Pa 下，当 C 含量在 100  $\mu\text{g/g}$  时，理论 O 含量就能达到 10  $\mu\text{g/g}$  以下，随 C 含量升高，合金熔体中的 O 含量迅速下降。GH3625 合金中 C 含量一般在 500  $\mu\text{g/g}$  左右，但在真空度分别为 13、0.1 Pa 时，C、O 含量的实验值均在真空度 100 Pa 时 C-O 反应平衡计算值左右，实验真空度比该真空度高出 1~3 个数量级，说明实验真空度下 C-O 反应远未达到平衡值。C-O 反应动力学<sup>[12]</sup>研究表明，碳在扩散边界层的扩散行为是 C-O 反应速率的决定阶段，碳的扩散受到限制会导致 C-O 反应不完全。所以单纯用 C 脱氧不能达到高温合金对氧含量的要求，还需用其他脱氧剂共同净化才能达到理想的去气效果。C 除了净化去气作用外，在高温合金中还有另一不容忽视的作用，即碳在凝固或热加工过程中以大量碳化物形式在枝晶间、晶界处析出，提高了晶界的强度与耐蚀性能。

金属 Ca 具有优良的脱氧作用，工业生产中常以钙或钙合金形式直接加入金属熔池。本实验中钙以 GH3625 合金片包覆团方式在合金熔清后加入。经熔化期 C 充分脱氧后加入 Ca 进一步脱 O 至 6  $\mu\text{g/g}$ 。镍

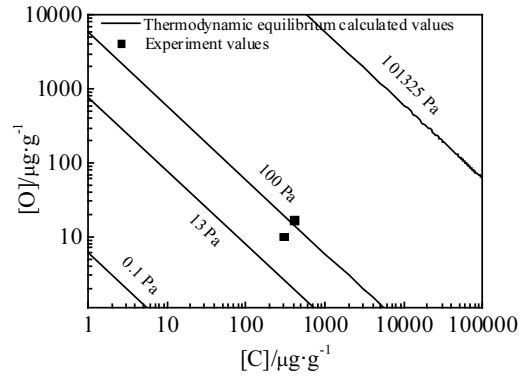


图 1 不同真空度下 C-O 反应热力学平衡关系及实验值  
Fig.1 Equilibrium and experiment values of [C] and [O] under different vacuum levels

合金液熔炼过程中 Ca-O 反应方程式为：



反应式(8)标准反应吉布斯自由能为<sup>[6]</sup>：

$$\Delta G_r^0 = -560560 + 144.06 T \quad (9)$$

平衡常数与温度的关系为：

$$\lg K_{CaO} = \frac{29282}{T} - 7.53 \quad (10)$$

平衡常数与反应组元活度系数的关系为：

$$K_{CaO} = \frac{a_{CaO}}{a_{Ca}a_O} = \frac{a_{CaO}}{f_{Ca}[Ca\%]f_O[O\%]} \quad (11)$$

式(11)两边取对数得：

$$\lg K_{CaO} = \lg a_{CaO} - \lg f_{Ca} - \lg [Ca\%] - \lg f_O - \lg [O\%] \quad (12)$$

由表 4 已有数据估算得到  $f_O=9.74 \times 10^{-3}$ ， $f_{Ca}=1.76 \times 10^{-3}$ ，以纯物质为标准态，CaO 活度为 1。根据式(12)计算得到 Ca 含量分别为 0.5%，1.0%，1.5%时，GH3625 合金熔体中的平衡氧含量，结果见表 5。由表 5 可以看出，随 Ca 含量的增加，合金液中溶解的 O 含量不断降低，0.5%的 Ca 可以将合金中的氧降至 10  $\mu\text{g/g}$  以下。比较实验结果和计算值可以看出，加 Ca 净化后合金实际 O 含量低于计算值。这是由于合金中的氧是由熔体中 C-O, Ca-O, Al-O 共同反应达到的平衡结果。

重熔后发现合金液面附近的坩埚内壁附着一层灰色物质，取此处坩埚壁研磨成粉末，用 X 射线衍射仪分析工艺 1、2 熔炼后的坩埚成分变化，如图 2 所示。由图 2 可知，工艺 1 所用坩埚成分未发生改变，为  $Al_2O_3$

表 5 不同 Ca 含量时 GH3625 合金熔体中平衡氧含量  
Table 5 Equilibrium oxygen content under different Ca contents in alloy liquid

Ca content, ω/%	0.5	1.0	1.5
O content/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	9	5	3

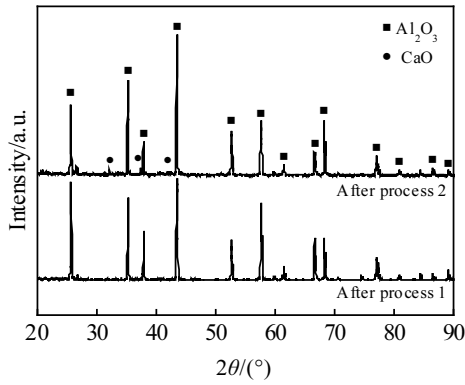
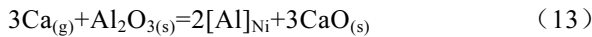


图 2 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 坩埚壁粉末 X 射线衍射图谱  
Fig.2 XRD patterns of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> crucible powder

相；工艺 2 重熔后的坩埚成分中除主要的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 相外，还含有微弱的 CaO 峰，从而验证了添加金属 Ca 重熔时，会有 CaO 生成。

此外，加钙合金液可能与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 坩埚材质发生如下反应：



该反应由表 2 中工艺 2 重熔后合金的 Al 含量明显高于高真空工艺 1 重熔合金的 Al 含量而得到验证。由于坩埚材质中的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 被合金液中的 Ca 还原，所以高真空加钙重熔合金的 Al 含量有所增加，被还原出来的 Al 也会参与脱氧反应，有利于合金液的深度脱氧。所以利用 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 坩埚加 Ca 净化能达到理想的脱氧效果。

### 2.3.2 GH3625 合金熔体中 Ca-S 反应的平衡关系

金属 Ca 除具有优良的脱氧作用外，还具有良好的脱 S 能力。镍合金液中的 Ca-S 反应如下：



反应式(14)的标准反应吉布斯自由能及平衡常数<sup>[8]</sup>为：

$$\Delta G_r^0 = -421488 + 123.72 T \quad (15)$$

$$\lg K_{\text{CaS}} = \frac{22017}{T} - 6.46 \quad (16)$$

$$K_{\text{CaS}} = \frac{a_{\text{CaS}}}{a_{\text{Ca}} a_{\text{S}}} = \frac{a_{\text{CaS}}}{f_{\text{Ca}} [\text{Ca}\%] f_{\text{S}} [\text{S}\%]} \quad (17)$$

两边取对数：

$$\lg K_{\text{CaS}} = \lg a_{\text{CaS}} - \lg f_{\text{Ca}} - \lg [\text{Ca}\%] - \lg f_{\text{S}} - \lg [\text{S}\%] \quad (18)$$

以纯物质为标准态，CaS 活度为 1，计算得  $f_{\text{S}}=11.22$ ，代入上式，得到不同 Ca 含量时 GH3625 合金熔体中平衡 S 含量，结果见表 6。由表 6 可以看出，随 Ca 含量的增加，合金液中溶解的 S 含量不断降低，0.5% 的 Ca 可以将合金液中的 S 降至 5 μg/g，但实际加入合金液中的 Ca 只有部分参与 Ca-S 反应，因此实测值高于计算值。对经工艺 1,2 使用过的坩埚壁含 S 量进行检测，

表 6 不同 Ca 含量时 GH3625 合金熔体中平衡 S 含量  
Table 6 Equilibrium sulphur content under different Ca contents in alloy liquid

Ca content, ω/%	0.5	1.0	1.5
S content/μg·g <sup>-1</sup>	5	2	1.7

表 7 不同氮分压下氮在 GH3625 合金熔体中溶解度的计算值

Table 7 Calculated values of nitrogen solubility in alloy GH3625 under different nitrogen partial pressures

$P_{\text{N}_2}/\text{Pa}$	101325	13	1	0.1
N content/μg·g <sup>-1</sup>	1250	14	4	1

其含量分别为 10、20 μg/g，说明合金熔炼过程中合金液中的 S 通过反应产物上浮、吸附而进入坩埚壁，从而使合金中 S 含量大幅度降低。

### 2.3.3 氮在 GH3625 合金中的溶解度计算

氮在镍基高温合金熔体中的溶解度服从 Sievert 定律。其溶解反应为：

$$\frac{1}{2} \text{N}_2 = [\text{N}]_{\text{Ni}} \quad (19)$$

反应式(19)平衡常数与温度的关系<sup>[15]</sup>为：

$$\lg K_{\text{N}} = -\frac{3630}{T} - 0.883 \quad (20)$$

$$K_{\text{N}} = \frac{f_{\text{N}} [\text{N}\%]}{P_{\text{N}_2}^{0.5}} \quad (21)$$

由式(21)得氮在镍合金液中的溶解度为：

$$\lg [\text{N}\%] = \lg K_{\text{N}} - \lg f_{\text{N}} + \frac{1}{2} \lg P_{\text{N}_2} \quad (22)$$

由表 4 可以看出，合金元素 Cr、Ti 显著降低 N 的活度系数，从而使镍基合金熔体中 N 溶解度增加。尤其 Ti 与 N 具有很强的亲和力，容易形成 TiN，因此 TiN 对合金液脱氮严重不利。由表 4 计算得  $f_{\text{N}}=0.012$ ，将其代入式(22)，得到 1600 °C 时不同氮分压下氮在 GH3625 合金熔体中溶解度的平衡值，如表 7 所示。氮分压近似等于真空感应熔炼炉内真空度(13, 0.1 Pa)时，GH3625 合金中氮的固溶度分别为 14 和 1 μg/g，高真空作用能使 N 脱除 91%。而熔炼结果的实测值分别为 100, 70 μg/g，远高于计算值。这表明 GH3625 合金熔体中，除固溶的 N 外，大部分氮以氮化物的形式存在于合金基体中。尤其是合金脱氧脱硫良好，更加剧了氮化物的形成。氮化物不能有效排出，从而导致 N 含量偏高。

## 3 结 论

- 1) 高真空感应重熔使合金元素 C、Al、Cr、Fe 略微烧损，而 Mo、Nb 富化，但都在标准成分范围内。
- 2) 高真空感应不加 Ca 重熔时，脱 O 效果明显，合金中氧含量由 17 μg/g 降至 10 μg/g，合金熔体中的

氧通过 C-O 反应脱除, 去氮效果次之, N 含量由 100  $\mu\text{g/g}$  降至 70  $\mu\text{g/g}$ , S 含量从 24  $\mu\text{g/g}$  降至 20  $\mu\text{g/g}$ , 基本无影响; 高真空加 0.5% 钙作净化剂重熔 GH3625 合金, 可使合金中的氧、氮、硫含量进一步降至 6, 60, 9  $\mu\text{g/g}$ , 尤其具有显著的脱 O、S 效果。

3) 热力学计算表明, 高真空 C-O 反应由脱氧动力学条件控制, O 含量降低的程度有限, 高真空加 Ca 感应重熔时 Ca-O 反应以及 Ca 与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  坩埚内壁反应, 有利于深度脱氧, 通过 Ca-S 反应使合金中 S 含量大幅度降低, 然而氮含量降低程度有限, 含量远高于 N 在 GH3625 合金中的溶解度, 这主要受限于氮化物的排出情况。

#### 参考文献 References

- [1] Niu Jianping(牛建平). *Preparation Technology of Clean Steel and Superalloys*(纯净钢及高温合金制备技术)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009: 212
- [2] Eiselstein H L, Tillack D J. *Superalloys 718, 625 and Various Derivatives*[C]. Warrendale: TMS, 1991: 1
- [3] Yuan Chao(袁超), Guo Jianting(郭建亭), Li Gusong(李谷松) et al. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2011, 21(4): 733
- [4] Li Shoujun(李守军), Hu Yaohe(胡尧和), Mei Hongsheng(梅洪生) et al. *Journal of Iron and Steel Research*(钢铁研究学报)[J], 2003, 15(S1): 317
- [5] Sun Changjie(孙长杰), Xing Jiping(邢纪萍). *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 1998, 34(7): 731
- [6] Niu Jianping(牛建平), Yang Kenu(杨克努), Sun Xiaofeng(孙晓峰) et al. *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2002, 38(3): 303
- [7] Niu Jianping(牛建平), Yang Kenu(杨克努), Jin Tao(金涛) et al. *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2001, 37(9): 943
- [8] Niu Jianping(牛建平), Yang Kenu(杨克努), Jin Tao(金涛) et al. *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2001, 37(5): 499
- [9] Niu Jianping(牛建平), Yang Kenu(杨克努), Xiaofeng(孙晓峰) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2003, 32(1): 63
- [10] Niu Jianping(牛建平), Sun Xiaofeng(孙晓峰), Jin Tao(金涛) et al. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2002, 12(2): 217
- [11] Wei Shoukun(魏寿昆). *Thermodynamics of Metallurgical Processes*(冶金过程热力学)[M]. Beijing: Science Press, 2010: 329
- [12] Yang Kenu(杨克努), Sun Congxi(孙从熙), Shen Jianian(沈加年). *Iron and Steel*(钢铁)[J], 1982, 17(2): 9
- [13] Cho S W, Suito H. *Metallurgical and Materials Transactions B*[J], 1995, 26(2): 249
- [14] Chen Jiexiang(陈家祥). *Common Chart Data Handbook for Steelmaking*(炼钢常用图表数据手册)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2010: 758
- [15] Wang Zhendong(王振东), Cao Kongjian(曹孔建), He Jilong(何纪龙). *Induction Furnace*(感应炉熔炼)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009: 343
- [16] Аверин В В. Translated by Yu Xinchang(余新昌), Zhang Yanhua(张彦华), Su Jian(苏健). *Nitrogen in the Metal*(金属中的氮)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1981: 75

## Purification in Alloy GH3625 Through Vacuum Induction Remelting

Ding Yutian, Wang Wei, Li Haifeng, Guo Tingbiao, Hu Yong, Liu Jianjun

(State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** For further reduction of oxygen, nitrogen and sulphur contents in master alloy GH3625, two vacuum induction remelting experiments (high vacuum without calcium and high vacuum with calcium addition) were carried out. The effect of vacuum induction remelting purification on the composition and purity of the alloy were investigated. The results show that under high vacuum induction remelting burning loss and enrichment of alloying elements are all in the range of standard composition; deoxidation is excellent under high vacuum induction remelting, and O content is reduced from 17  $\mu\text{g/g}$  to 10  $\mu\text{g/g}$  by C-O reaction; but removal of nitrogen and sulphur is not obvious. During high vacuum induction remelting with 0.5% Ca addition, Ca-O and Ca- $\text{Al}_2\text{O}_3$  (the inner wall of crucible) reaction is helpful to deep deoxidation; Ca-S reaction reduces S content greatly, while the decrease in nitrogen content is limited, which is far higher than N solubility in alloy GH3625. In the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  crucible, high vacuum melting technology with proper calcium addition could reduce oxygen, nitrogen and sulphur contents to 6, 60, and 9  $\mu\text{g/g}$ , respectively.

**Key words:** GH3625; purification; vacuum induction remelting

Corresponding author: Wang Wei, Master, State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, P. R. China, Tel: 0086-931-2973561, E-mail: 609069614@qq.com