

氧化铝坩埚与高温合金的界面反应机制

姜卫国<sup>1,2</sup> 郭万军<sup>3</sup> 董琳<sup>1,2</sup> 刘飞扬<sup>3</sup> 李延昭<sup>1,2</sup> 李强<sup>1,2</sup> 谢冬柏<sup>1,2</sup> 王瑞春<sup>1,2</sup> 任玉艳<sup>1,2</sup>  
(1.潍坊科技学院智能制造学院; 2.潍坊市先进动力系统用热端材料及单晶部件制备重点实验室;  
3.江苏集萃先进金属材料研究所有限公司)

**摘要** 研究了真空感应熔炼过程中氧化铝坩埚与高温合金的界面反应过程。结果表明,高温合金熔炼过程中,合金中的 Cr、Al 等元素与坩埚内壁中的 SiO<sub>2</sub> 反应生成 Si 及 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,生成的 Si 进入到熔体中形成 Al<sub>4</sub>Si、Cr<sub>3</sub>Ni<sub>2</sub>Si 等硅化物,在高温真空环境下挥发并在熔体液面以上的坩埚壁上形成沉积层;生成的 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 与熔体液面以下坩埚壁中的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 反应生成粉红色的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 固溶体反应层,反应层厚度随坩埚内熔体深度的增加而增大。随坩埚使用次数的增加,合金熔体表面浮渣明显增多。

**关键词** 真空感应熔炼; 高温合金; 氧化铝坩埚; 界面反应

**中图分类号** TG27;TG132.32 **文献标志码** A

**DOI**:10.15980/j.tzzz.2023.03.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Interfacial Reaction Mechanism between Alumina Crucible and Nickle-based Superalloy

Jiang Weiguo<sup>1,2</sup>, Guo Wanjun<sup>3</sup>, Dong Lin<sup>1,2</sup>, Liu Feiyang<sup>3</sup>, Li Yanzhao<sup>1,2</sup>, Li Qiang<sup>1,2</sup>, Xie Dongbai<sup>1,2</sup>,  
Wang Ruichun<sup>1,2</sup>, Ren Yuyan<sup>1,2</sup>

(1.School of Intelligent Manufacturing, Weifang University of Science and Technology; 2. Weifang Key Laboratory of High-temperature Materials and Single Crystal Components Fabrication Technology for Advanced Engine System; 3.Jiangsu JITRI Novel Metal Research Institute Co., Ltd.)

**Abstract:** The interfacial reaction between alumina crucible and superalloy during vacuum induction melting was investigated. The results indicate that the Cr and Al elements of superalloy can react with SiO<sub>2</sub> inside the inner wall of crucible to form Si and Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. The generated Si is diffused into superalloy to form Al<sub>4</sub>Si and Cr<sub>3</sub>Ni<sub>2</sub>Si silicide, which can volatilize under high vacuum atmosphere, and deposite on the surface of the crucible wall above melt to form sedimentary layer. The generated Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> reacts with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> inside the inner wall of crucible below melt to form Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> solution layer, of which the thickness is increased with the increase of the melt depth. The slag amounts on the surface of melt are increased apparently with crucible usage.

**Key Words:** Vacuum Induction Melting, Superalloy, Alumina Crucible, Interfacial Reaction

高温合金具有蠕变与疲劳性能优异、抗氧化和抗热腐蚀性能优良等特点,广泛用于航空发动机、重型地面燃机、舰载燃气轮机等热端部件的制造。单晶高温合金由于去除了横向晶界的影响,其高温综合性能得到了显著提高<sup>[1-2]</sup>,但由于其成分复杂,少量杂质都会明显降低其性能,因此,必须精确控制高温合金成分及杂质含量<sup>[3]</sup>。

高温合金中杂质来源主要包括母合金、真空环境、坩埚、型壳、陶瓷型芯及浇注系统等。提高高温合金的纯净度目前主要有两条途径,一种是采用物理或化学方法去除高温合金中的非金属夹杂物;另一种是避免高温合金定向凝固过程中的污染<sup>[4]</sup>。高温合金定向凝固过

程包括熔炼、浇注及凝固过程。这 3 个过程都可能有杂质元素或夹杂物进入到合金中,导致合金纯净度下降。浇注过程中的过滤系统起着非常重要的作用,可有效过滤各种夹杂<sup>[5-6]</sup>,尽管如此,合金熔体中进入的杂质元素或夹杂物无法全部滤除。定向凝固过程中合金与型壳及陶瓷型芯的反应也是非常重要的环节。相关研究表明,型壳与合金熔体发生界面反应,导致合金成分的变化,严重时产生粘砂现象<sup>[7-11]</sup>;陶瓷型芯与熔体反应可导致铸件内腔表面形成多种缺陷<sup>[12-13]</sup>,同时,界面反应产物也会污染合金。

高温合金在真空感应炉内进行熔炼时温度通常高于定向凝固温度,熔炼过程中合金熔体与坩埚内表面长

收稿日期:2022-04-25;修改稿收到日期:2022-10-10  
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51674235)  
第一作者简介:姜卫国,男,1968 年出生,教授,山东寿光(262700),E-mail: jwg@wfust.edu.cn  
引用格式:姜卫国,郭万军,董琳,等. 氧化铝坩埚与高温合金的界面反应机制[J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(3):308-313.  
JIANG W G, GUO W J, DONG L, et al. Interfacial reaction mechanism between alumina crucible and Nickle-based superalloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(3):308-313.

时间接触,由于合金中通常含有一定量的 Al、C、Cr 等活性元素,这些元素与坩埚中的 SiO<sub>2</sub> 容易发生界面反应,反应产物进入熔体中并降低熔体的纯净度。尽管采用 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO 与 MgO 材质坩埚对提高熔体纯净度有益<sup>[14-15]</sup>,但存在成本高、储存困难、不易成形等缺点,目前在还没有大规模化应用,常用的仍然是 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 坩埚。

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 坩埚在熔炼温度为 1 550~1 600 ℃下与熔体之间的界面反应容易对合金造成污染,因此,研究氧化铝坩埚与合金熔体之间的界面反应过程对高温合金纯净化冶炼十分必要。

1 试验方法

试验材料采用高纯度氧化铝坩埚(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 质量分数>99.9%),坩埚容量为 10 kg,用 VIM-F25 型定向凝固真空感应炉熔炼,熔炼温度为 1 550~1 600 ℃,熔炼时间

为 30 min,真空度控制在 3 Pa 以下,根据铸造高温合金锭浮渣试验方法(HB 5406-2016)测量熔体浮渣面积占比。合金成分见表 1。熔炼 10 炉次后,利用 JSM-6301F 型扫描电镜观察坩埚内表面及截面组织形貌,采用能谱 EDS 分析坩埚内表面成分组成,利用 D/Max-2500PC 型 X 射线衍射仪确定坩埚内表面反应产物。

表 1 高温合金的名义成分

| Tab.1 Nominal composition of the superalloy |    |     |   |    |    |     |     |      |    | % |
|---------------------------------------------|----|-----|---|----|----|-----|-----|------|----|---|
| $\omega_B$                                  |    |     |   |    |    |     |     |      |    |   |
| Cr                                          | Co | Mo  | W | Ta | Al | Ti  | Re  | C    | Ni |   |
| 2.5                                         | 9  | 1.5 | 6 | 8  | 6  | 0.2 | 4.0 | 0.01 | 余量 |   |

2 试验结果及分析

2.1 试验结果

熔炼10炉次的坩埚截面形貌见图1。从图1a看

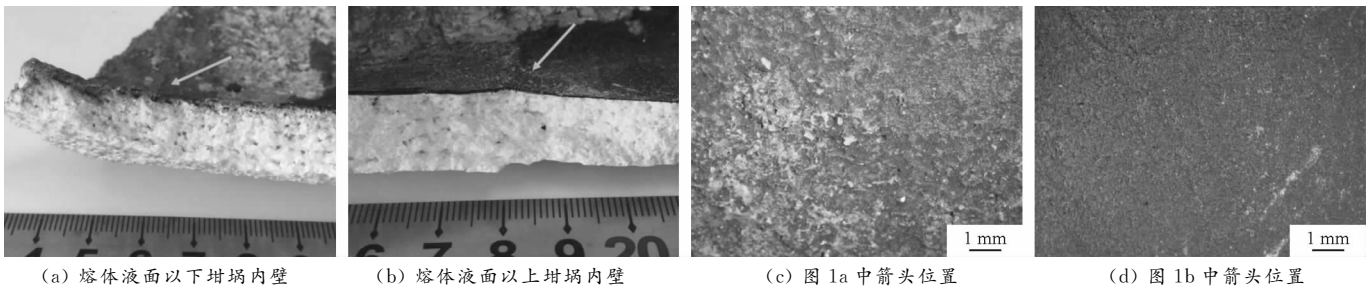


图 1 坩埚内壁宏观形貌  
Fig.1 Morphologies of inner wall of the crucible

出,坩埚内壁存在一层深灰色组织,表面存在颗粒状物质且粗糙不平。从图 1b 看出,表层呈黑色,表面较平,明显不同于图 1c。

图 2 为坩埚表层截面形貌及能谱分析结果。可以看出,原始坩埚表层与其内部一致,坩埚内壁表层包括 Al、Si、O 元素,这与坩埚材质 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 与 SiO<sub>2</sub> 一致(见图 2a 和图 2b);熔体液面以上坩埚内壁表层能谱分析表明,坩埚壁表层主要包括 Cr、Ni、O、Co 等元素,其中含量最高的为 Cr,其次为 Ni 和 O (见图 2d);熔体液面以下坩埚内壁表层能谱分析表明,坩埚内壁表层主要包括 Al、Cr、Ni、O、Si 等元素,其中含量最高的为 Al,其次为 O、Ni 和 Cr(见图 2e、图 2f)。

距熔体液面不同距离的坩埚内表面反应层形貌见图 3。可以看出,随熔体深度的增加,坩埚内表面反应层趋于严重,反应层厚度增加,距离熔体液面距离 30 mm 处反应较轻,未观察到深灰色产物,距离熔体液面 120 mm 处反应层厚度可达 1 mm 左右,可清晰观察到有灰白色反应产物生成。

图 4 为 3 种典型位置的坩埚内表面形貌。可以看出,原始坩埚壁表面组织具有明显的陶瓷材料特征,表面分布着颗粒尺寸不同的氧化铝颗粒(见图 4a 和图 4b);熔体液面以上坩埚壁表面为团状颗粒组织,具

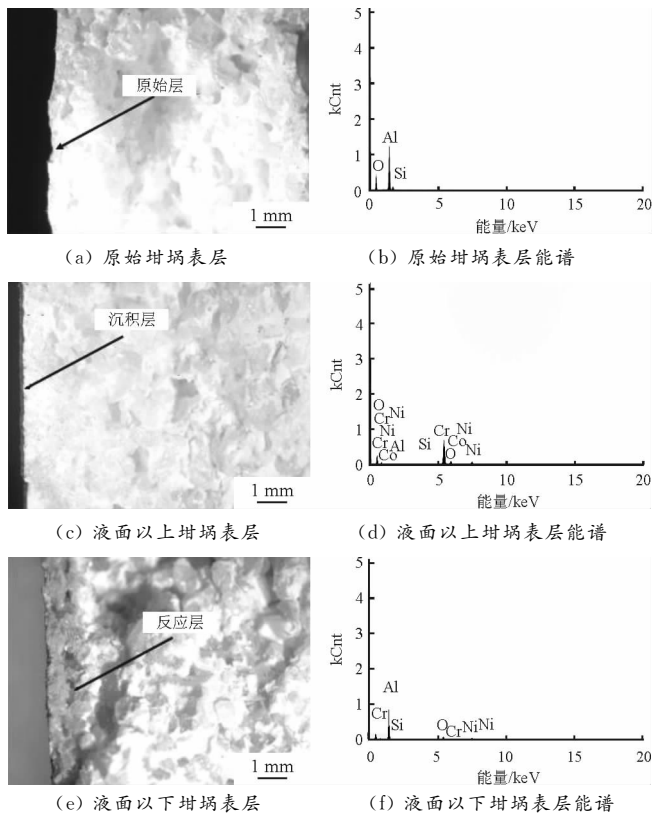


图 2 定向凝固后坩埚内表层形貌及表面能谱  
Fig.2 Morphologies and EDS results of inner surface layer of the crucible after directional solidification

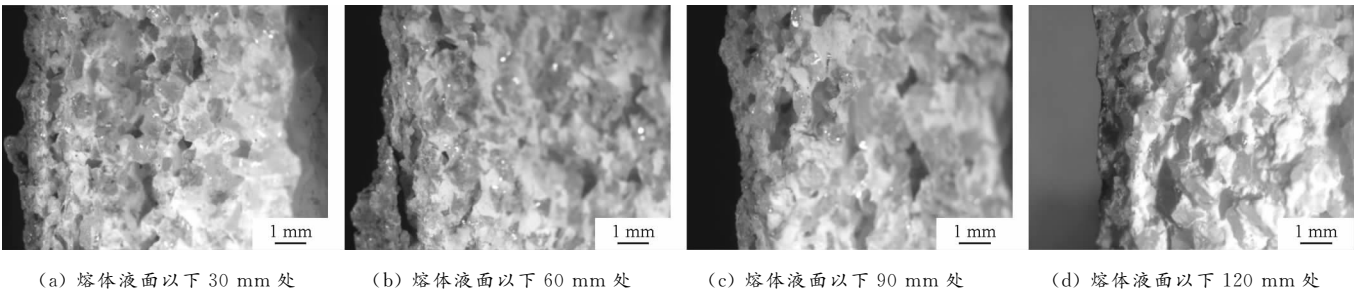
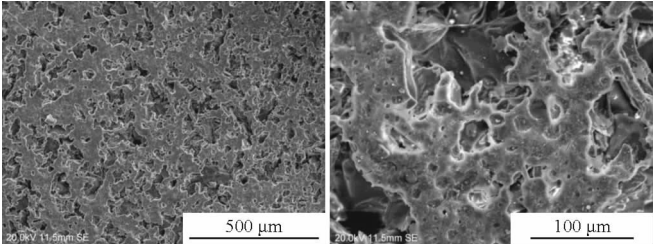


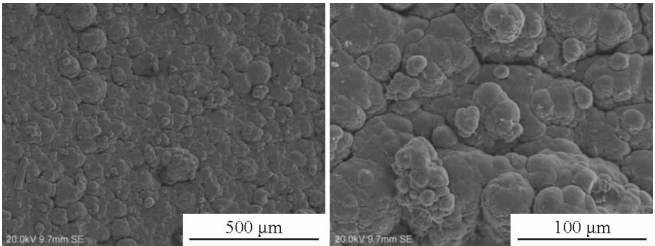
图 3 不同高度坩埚内表面反应层形貌

Fig.3 Morphologies of reaction layer on inner surface of the crucible

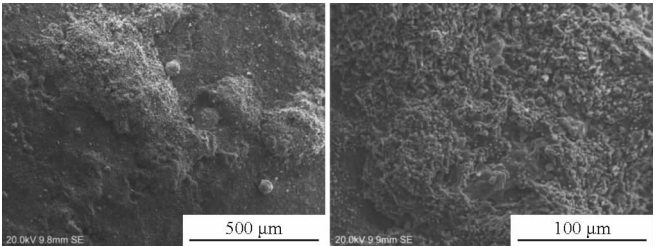
有明显的沉积特征,见图 4c 和见图 4d;熔体液面以下坩埚壁表面组织与以上两种组织都不同,表面凸凹不平



(a) 原始坩埚内壁,低倍      (b) 原始坩埚内壁,高倍



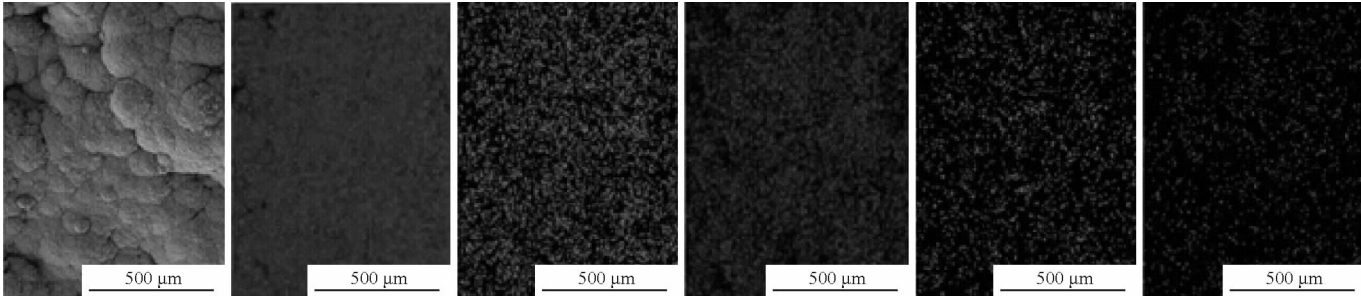
(c) 液面以上坩埚内壁,低倍      (d) 液面以上坩埚内壁,高倍



(e) 液面以下坩埚内壁,低倍      (f) 液面以下坩埚内壁,高倍

图 4 使用前后坩埚内表面组织

Fig.4 Microstructure of the inner surface of the crucible

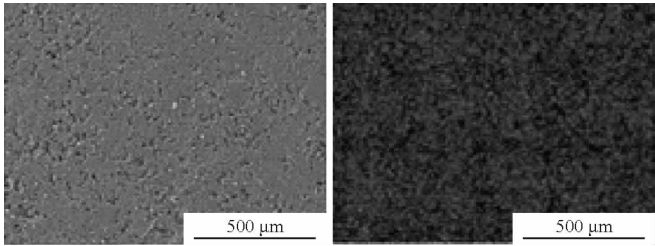


(a) SEM 形貌      (b) Cr 面扫描      (c) Ni 面扫描      (d) O 面扫描      (e) Al 面扫描      (f) Si 面扫描

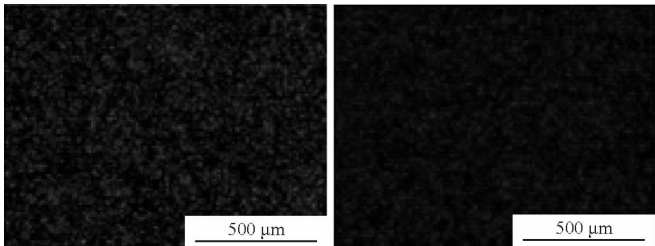
图 6 坩埚熔体液面以上元素面分布

Fig.6 EDS mapping on the inner surface of the crucible above molten surface

且粘接着细小的颗粒(见图 4e 和图 4f)。3 种不同位置坩埚内表面能谱面分布表明,原始坩埚内表面分布着 Al、Si、O,熔体液面以上坩埚内表面分布着 Cr、Ni、O、Al 与 Si 等元素,熔体液面以下坩埚内表面则分布着 Al、Cr、Ni、O、Si 和 Co 等元素,具体见图 5~图 7。图 8 为坩埚表层截面 SEM 组织形貌。可以看出,3 种典型位置表层组织结构明显不同,原始坩埚表层与内部组织基本一致,细颗粒组织中分布着大小不一的  $Al_2O_3$  颗



(a) SEM 图      (b) Al 面扫描



(c) Si 面扫描      (d) O 面扫描

图 5 坩埚内表面 SEM 形貌及元素面分布

Fig.5 SEM morphology and EDS mapping of the inner surface of the crucible

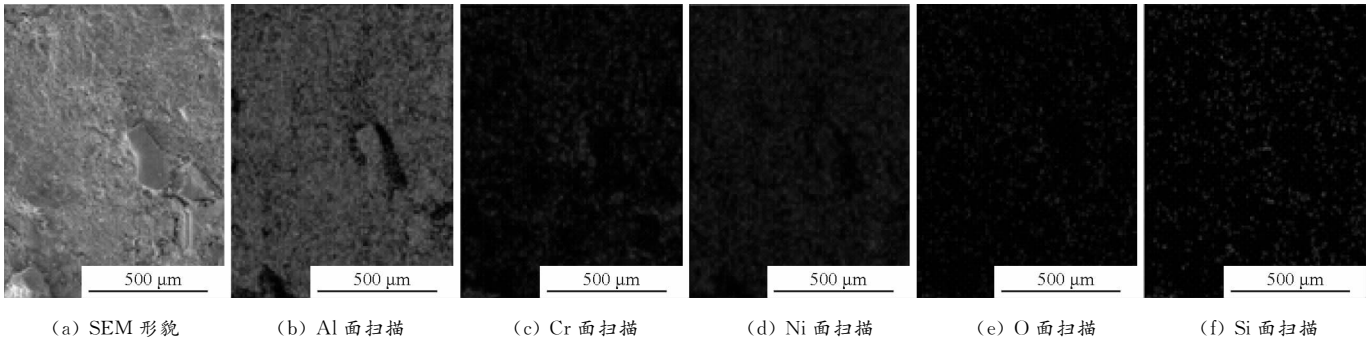


图 7 坩埚熔体液面以下元素面分布

Fig.7 EDS mapping on the inner surface of the crucible below molten surface

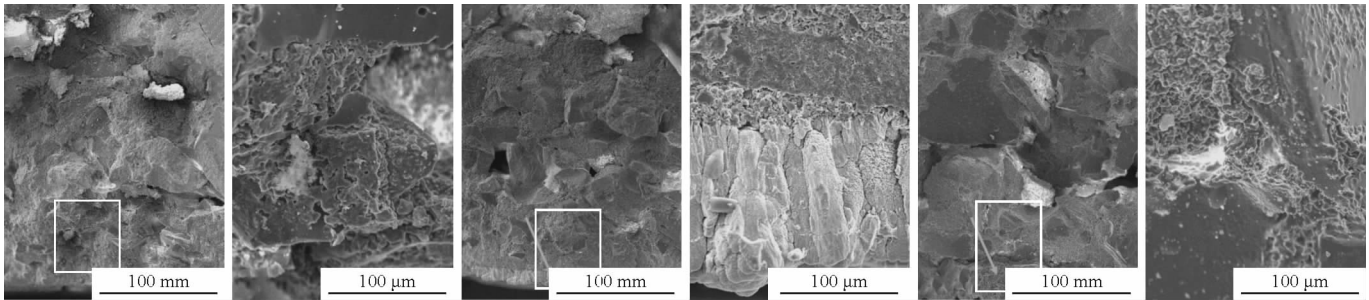


图 8 坩埚内壁截面组织

Fig.8 Microstructure of inner surface layer of the crucible

粒,熔体液面以上坩埚壁表层存在着一层与其表面近似垂直的柱状物组织,其厚度约为 100 μm,而熔体液面以下坩埚壁表层组织比原始表层组织相对粗大。

图 9 为 3 种典型坩埚内表面 XRD 组织。可以看出,原始坩埚内壁组成物为  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{SiO}_2$ ,熔体液面以上坩埚内壁表面为 Al、Cr 和 Ni 的硅化物及金属间化合物  $\text{AlNi}$ ,熔体液面以下坩埚内壁表面同样也为 Al、Cr 和 Ni 的硅化物。不同炉次下,合金熔体与坩埚内表面的反应会导致熔体表面浮渣明显增多,第一炉次浮渣面积只有 0.2%,而第 10 炉次中浮渣面积分数达到了 22.5%,见图 10。

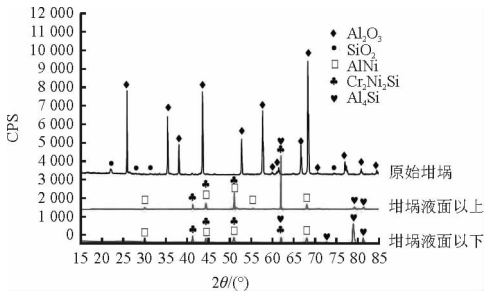
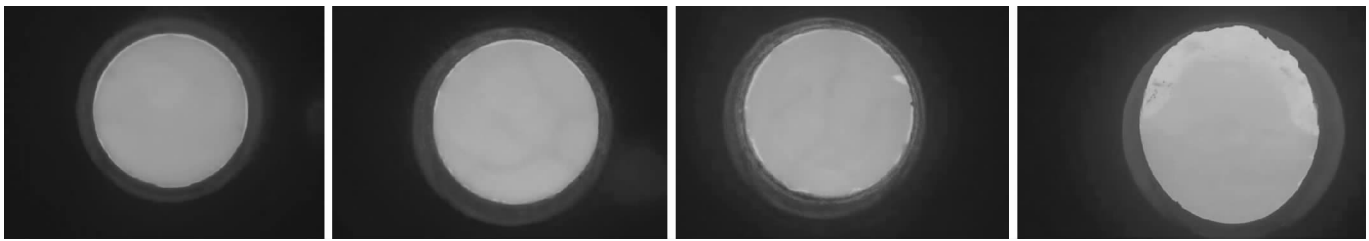


图 9 坩埚内表面反应产物 XRD

Fig.9 XRD patterns of reacted product on the inner surface of the crucible



(a) 第 1 炉浮渣面积为 0.2% (b) 第 2 炉浮渣面积为 0.3% (c) 第 3 炉浮渣面积为 1.9% (d) 第 10 炉浮渣面积为 22.5%

图 10 熔体表面浮渣面积分数

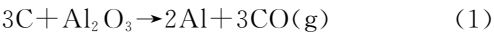
Fig.10 Area fraction of slag on the surface of melt

2.2 试验分析

高温合金真空感应熔炼过程中,真空度一般不大于 3 Pa,熔炼温度一般都比较,通常为 1 550~1 600 ℃。如此高的温度下,合金熔体中的活性元素 C、Ti、Al 及

Cr 等容易与坩埚内表面作用并发生界面反应。

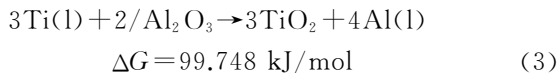
C 与坩埚中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  及  $\text{SiO}_2$  可能发生的反应为:



反应过程中形成的  $\text{CO}$ 、 $\text{SiO}$  以气体方式排出,Al

本身为合金中的组成元素,不会造成污染。同时,试验合金中的 C 含量只有 0.01%,如此低的含量并未达到界面反应所需达到临界值<sup>[9]</sup>,其反应可能不发生或反应程度很低,因此,C 与坩埚内表面的反应可以不考虑。

合金熔体中 Ti 与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  坩埚可能发生的反应如下<sup>[16]</sup>:



可见,两者反应的自由能为正,熔体中的 Ti 与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  之间的反应不能自发进行。

高温合金熔体中 Ti 与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  坩埚中的添加剂  $\text{SiO}_2$  是可以反应的,试验中 Ti 元素含量很低,因此,该反应对界面反应的影响可以忽略。

熔体中的 Al 与坩埚中  $\text{SiO}_2$  可能存在如下的反应<sup>[17]</sup>:

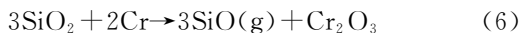


该反应的自由能可计算如下<sup>[18]</sup>:

$$\Delta G^\circ = -668.1 + 0.139 T \quad (5)$$

在 1 550~1 600 °C 时,该反应自由能为 -414.703~-407.753 kJ/mol,因此,该反应可以进行。

真空环境下,熔体中 Cr 与坩埚中  $\text{SiO}_2$  可能发生如下的反应<sup>[17-19]</sup>:



尽管该反应的热力学数据很少,尚无法给出具体的反应自由能,但在多个试验中发现该反应是可以发生<sup>[7, 9, 19-20]</sup>。反应形成的  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  进入到  $\text{Al}_2\text{O}_3$  中生成  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$  固溶体,由于其中  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  含量较低,反应产物呈粉色<sup>[21]</sup>。图 2e 及图 3 表明,确有粉色的  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$  生成。形成的  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  扩散到坩埚表层的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒表面并与其生成固溶体  $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ ,由于坩埚内表面上粘附的合金及其他反应产物的影响,表面 XRD 图谱中并没有发现  $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ ,但图 1 观察到坩埚内层存在粉色  $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$  固溶体组织。

界面反应过程中形成的 Si 可进入到熔体中并和 Ni、Cr、Al 等形成硅化物(见图 9),由于硅化物挥发性强<sup>[22]</sup>,而熔体液面以上坩埚壁温度逐渐降低,因此,硅化物挥发后遇到较低温度的坩埚壁会凝固,致使其沉积在熔体液面以上的坩埚壁上并进行沉积生长,最终形成与壁面垂直的沉积层组织,见图 8。这种组织形成后,可能在后续炉次熔炼合金过程中脱落而进入合金熔体中,导致熔体表面浮渣增多并污染合金熔体。

熔体液面以下不同深度坩埚壁反应层厚度不同,这和熔体受到的压力有关。坩埚为陶瓷烧结制成,其表面存在一定量的孔洞,见图 8。高温合金熔体与坩埚壁之间的润湿性较差,特别是当 C 含量较低时,其润湿性更

差<sup>[9]</sup>,因此,随熔体深度增大,该处熔体受到的压力也随之增大,熔体可浸入坩埚表层厚度也随之增大,这扩大了界面反应面积,直接导致了坩埚底部的反应层厚度明显大于其他位置的反应层厚度。

需要说明的是熔体与坩埚壁反应过程中,坩埚内表面的细颗粒参与反应并逐渐消耗掉,而较大的颗粒反应慢或与坩埚壁粘附较强而不易脱落,因此反应后的坩埚表层截面组织相对粗大,见图 8e。

### 3 结 论

(1)高温合金熔炼过程中,合金中的 Al、Cr 等元素与坩埚内壁中的  $\text{SiO}_2$  反应生成 Si 及  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$ 。

(2)反应生成的 Si 进入到熔体中形成硅化物,硅化物在高温真空环境下挥发并冷却沉积在熔体液面以上的坩埚壁上,形成沉积层组织。

(3)反应生成的  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  与熔体液面以下的坩埚壁中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  反应生成  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$  固溶体层,固溶体层厚度随熔体深度增加而增大。

(4)随坩埚使用次数增加,坩埚内壁与熔体反应导致合金熔体表面浮渣明显增多。

### 参 考 文 献

- [1] 马德新. 高温合金叶片单晶凝固技术的新发展[J]. 金属学报, 2015, 51(10): 1 179-1 190.
- [2] 李金国, 孟祥斌, 刘纪德, 等. 单晶高温合金涡轮叶片的常见凝固缺陷及控制方法[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(11): 1 321-1 327.
- [3] 牛建平, 杨克努, 孙晓峰, 等. 采用  $\text{CaO}$  坩埚超纯净熔炼 Ni 基高温合金[J]. 机械工程材料, 2001, 25(5): 19-20.
- [4] 尹志冬, 戴斌煜, 刘智彬, 等. 高温合金净化技术研究现状[J]. 铸造, 2011, 60(5): 462-465.
- [5] 董加胜, 曲文生, 楼琅洪, 等. 新型陶瓷过滤器过滤净化对 K417 返回料组织性能的影响[J]. 材料导报, 2008, 22(3): 445-447.
- [6] 戴斌煜, 王薇薇, 李波. 过滤净化对 K4169 合金二次返回料力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36(12): 1 298-1 301.
- [7] 石振威, 郑伟, 卢玉章, 等. 镍基高温合金定向凝固用陶瓷型壳粘砂反应[J]. 材料研究学报, 2021, 35(4): 251-258.
- [8] 吴笑非, 姚建省, 王丽丽, 等.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  型壳与定向凝固合金 IC10 的界面反应[J]. 材料工程, 2021, 49(7): 141-147.
- [9] 陈晓燕, 金喆, 白雪峰, 等. C 对一种镍基高温合金与陶瓷型壳界面反应及润湿性的影响[J]. 金属学报, 2015, 51(7): 853-858.
- [10] 陈晓燕, 肖旅, 余建波, 等. 熔模铸造高温合金与陶瓷材料界面反应研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36(8): 844-848.
- [11] 龙宪翼, 刘亮, 余欢, 等. DZ22B 高温合金与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷型壳的界面反应[J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(5): 525-528.
- [12] 郑亮, 肖程波, 张国庆, 等. 高 Cr 铸造镍基高温合金 K4648 与陶瓷型芯的界面反应研究[J]. 航空材料学报, 2012, 32(3): 10-22.
- [13] 张俊, 黄嘉鹏, 尚根峰, 等. 一种镍基单晶高温合金与  $\text{SiO}_2$  基陶瓷型芯的界面反应研究[J]. 铸造技术, 2017, 38(4): 762-766.
- [14] SUTTON W H, JOHNSOW A. Reactions between  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{/MgO}$  Crucible Materials and a Vacuum Melted Hf-bearing Superalloy, Superalloys[A]. Proceedings of the Fourth International Symposium[C]. Champion PA, 1980.

# SLM 成形 Al-Mg-Li-Cu 合金残余应力及组织性能

孙金娥<sup>1, 2</sup> 贺亚飞<sup>3</sup>

(1. 北京科技大学天津学院材料科学与工程学院; 2. 北京科技大学新材料技术研究院;  
3. 北京科技大学天津学院基础部)

**摘 要** 通过阿基米德排水法以及试验测试综合分析选区激光熔融成形 Al-Mg-Li-Cu 合金的致密度、微观形貌和硬度等组织性能特征,探究了打印参数对合金残余应力的影响。结果表明,当粉末层厚( $T$ )、激光功率( $P$ )、舱口间距( $H$ )逐渐增加时,残余应力逐渐减小。当  $T$ 、 $P$ 、 $H$  一定时,残余应力随扫描速率的增加先减小后增大。在最佳打印参数如下: $P$  为 240 W、 $V$  为 140 mm/s、 $H$  为 100  $\mu\text{m}$ 、 $T$  为 50  $\mu\text{m}$  时,成形件的残余应力最小,为 56.53 MPa,且致密度高,硬度(HV)为 114。

**关键词** 选区激光熔融; Al-Mg-Li-Cu 合金; 残余应力; 致密度; 硬度

**中图分类号** TG146.22; TG249.9      **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.03.005      开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

Residual Stress, Microstructure and Properties of SLM-formed Al-Mg-Li-Cu Alloy

Sun Jin'e<sup>1, 2</sup>, He Yafei<sup>1</sup>

(1.School of Materials Science and Engineering, Tianjin College, University of Science and Technology Beijing;  
2.Institute for Advanced Materials and Technology, University of Science and Technology Beijing;  
3.Department of Foundation Courses, Tianjing College, University of Science and Technology Beijing)

**Abstract:** The density, micromorphology and hardness of SLM-formed Al-Mg-Li-Cu alloy were comprehensively investigated by Archimedes drainage method and tests. The influence of printing parameters on the residual stress of alloy was explored. The results indicate that the residual stress of Al-Mg-Li-Cu alloy is gradually reduced with the increase of powder layer thickness( $T$ ), laser power( $P$ ) and hatch spacing( $H$ ). When  $T$ 、 $P$ 、 $H$  are constant, the residual stress is decreased firstly and then increased as the scanning rate increases. The optimal printing parameters is presented as follows: laser power of 240 W, scanning rate of 140 mm/s, scanning spacing of 100  $\mu\text{m}$ , and layer thickness of 50  $\mu\text{m}$ , corresponding to the minimum residual stress of 56.53 MPa, where the alloy is highly dense, and the hardness is 114 HV.

**Key Words:** Selective Laser Melting, Al-Mg-Li-Cu Alloy, Residual Stress, Density, Hardness

收稿日期:2022-06-23;修改稿收到日期:2022-08-20  
基金项目:天津市教育科研计划资助项目(2021KJ605)  
第一作者简介:孙金娥,女,1987 年出生,副教授,天津(301800),E-mail:sunjine0406@163.com  
引用格式:孙金娥,贺亚飞. SLM 成形 Al-Mg-Li-Cu 合金残余应力及组织性能[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(3):313-317.  
SUN J E, HE Y F. Residual stress, microstructure and properties of SLM-formed Al-Mg-Li-Cu alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Al-  
loys, 2023, 43(3):313-317.

[15] BAI P, ZHANG H R, LI Y M, et al. Effect of  $\text{Y}_2\text{O}_3$  crucible on purification of  $\text{Ni}_3\text{Al}$ -based superalloy scraps[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(2): 406-410.

[16] 罗文忠, 沈军, 闵志先, 等. TiAl 合金定向凝固过程中与坩埚材料的界面反应研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(8): 1 441-1 445.

[17] CHEN X Y, ZHOUY H, JIN T, et al. Effect of carbon on wettability and interface reaction between melt superalloy and ceramic material[J]. MATEC Web of Conferences, 2014(14): 1-5.

[18] UEDA M, ABE Y, OHTSUKA T. Reduction of  $\text{SiO}_2$  to Si by aluminum metal fog in  $\text{NaCl-KCl-AlCl}_3$  molten salt[J]. Materials Letters, 2006, 60(5): 635-638.

[19] 朱永法, 苗冬, 曹立礼. Cr/ $\text{SiO}_2$ 界面还原反应研究[J]. 真空科学与技术, 1996, 16(2): 81-86.

[20] 吉莫尼斯.И.М, 卡尔波维奇.Ю.Ф, 格烈热尔.Г.М. 定向结晶时陶瓷与熔融合金的相互作用[J]. 航空材料学报, 1991(11): 62-63.

[21] FEDERICA B, ANNA M, CRISTINA L, et al. Reaction mechanism in alumina/chromia ( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$ ) solid solutions obtained by coprecipitation[J]. J. Am. Ceram. Soc., 2000, 83(8): 2 036-2 040.

[22] 马勤, 阎秉钧, 康沫狂, 等. 金属硅化物的应用与发展[J]. 稀有金属材料与工程, 1999, 28(1): 10-13.

(编辑:刘卫)

313