

# 复合电磁场作用下高温合金锭的真空熔铸技术研究

金文中<sup>1</sup>, 李素芳<sup>1</sup>, 李廷举<sup>2</sup>, 殷国茂<sup>2</sup>

(1. 洛阳理工学院 洛阳市先进材料成型技术重点实验室, 河南 洛阳 471023)

(2. 大连理工大学, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 系统研究了在 K417 高温合金真空熔铸过程中施加由工频交流电磁场和恒稳直流电磁场组成的复合电磁场对高温合金铸锭凝固组织的影响。实验结果表明: 在浇注完毕后同时施加 60 A 旋转电磁场和 290 A 恒稳直流电磁场的工艺条件下, 由于恒稳直流电磁场在金属液面处产生的电磁制动效应可以抑制施加旋转电磁场所引起的金属液面的波动, 不仅避免了因金属液面波动太大而使铸锭缩孔恶化的情况出现, 而且大幅提高了旋转电磁场在金属液凝固过程中的作用范围和效果, 最终得到细小等轴晶比例达到 96%、缩孔明显改善的优质高温合金铸锭。

**关键词:** 复合电磁场; 高温合金铸锭; 真空熔铸; 电磁制动; 缩孔

中图分类号: TG132.3\*2

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2015)06-1546-04

20 世纪 70 年代以后, 高性能铸造高温合金的发展和應用满足了航空喷气发动机和工业燃气涡轮机等热端部件性能方面的发展需求, 从而使铸造高温合金的应用变得越发重要和广泛。目前铸造高温合金一般采用双真空熔铸工艺, 即将原材料先在真空感应炉内熔炼并铸成母合金锭, 再在真空感应炉内重熔并浇注成铸件<sup>[1]</sup>。然而目前国内采用传统真空熔铸工艺预制的高温合金锭, 存在元素偏析严重、缩孔较多、气体和杂质的含量较高等问题, 从而影响了高温合金铸件的合格率。

在前期的工作中, 作者研究了在高温合金真空熔铸的凝固过程中施加旋转电磁场对 K417 高温合金铸锭质量的影响, 试验结果表明该方法能够细化高温合金铸锭的晶粒组织、改善中心缩孔和夹杂物的数量和分布、减轻枝晶偏析<sup>[2]</sup>。但该方法通过延迟电磁搅拌的开始时间来保证金属液面能够在电磁搅拌之前形成稳定的表面凝壳, 避免因金属液面波动太大而恶化铸锭的补缩条件。这导致旋转电磁场在金属液凝固过程中的作用范围和效果有限, 得到的高温合金铸锭总会存在一个在施加电磁场之前就已凝固形成的晶粒较大的柱状晶层, 这是一个旋转电磁场在金属熔体中产生的电磁搅拌和电磁净化作用没能达到的区域, 其纯净度和均匀性较差。

随着航空发动机以及工业燃气轮机等性能的提高, 对高温合金材料的品质提出了越来越高的要求。另一方面, 国内外对复合电磁场的应用研究越来越多, 而且研究表明, 施加复合电磁场能够进一步的改善铸坯的

质量<sup>[3,4]</sup>。因此本研究通过在铸造高温合金真空熔铸的凝固过程中施加由工频交流电磁场和恒稳直流电磁场组成的复合电磁场来进一步提高真空熔铸高温合金锭的质量, 旨在为解决采用传统真空熔铸工艺预制的高温合金锭存在的质量问题提供新的技术途径。

## 1 实验

### 1.1 实验装置

图 1 为试验装置示意图, 该装置主要由奥氏体不锈钢锭模、条形恒稳直流电磁场发生器、工频交流旋转电磁场发生器、真空中频感应熔炼炉、泡沫陶瓷过滤器、浇冒口系统以及相应的电源系统和水冷系统构成。其中, 条形恒稳直流电磁场发生器设置在奥氏体不锈钢锭模外侧上部, 工频交流旋转电磁场发生器设置在奥氏体不锈钢锭模外侧下部。

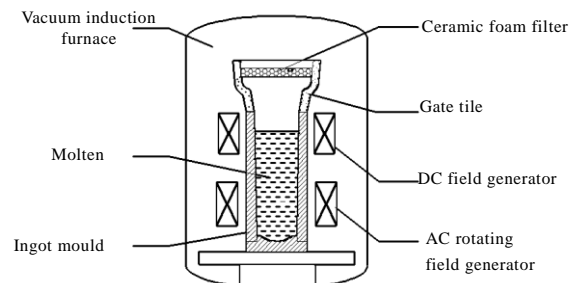


图 1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic of experimental apparatus

收稿日期: 2014-06-18

基金项目: 国家自然科学基金 (50474055)

作者简介: 金文中, 男, 1972 年生, 博士, 副教授, 洛阳理工学院机电系, 河南 洛阳 471023, E-mail: wenzhong\_jin0872@sina.com

## 1.2 实验原理

### 1.2.1 电磁搅拌原理

当工频交流电磁场发生器中通入三相交流电后会产一个旋转磁场。置于旋转磁场内的液态金属将产生感生电流, 液态金属作为载流导体, 在外加磁场的作用下产生电磁力, 该电磁力驱动液态金属在切线方向上做旋转运动。在旋转电磁场的作用下, 在铸坯内部从中心开始液态金属受到的电磁力迅速增加, 在凝固界面前沿液态金属的运动速度达到最大值, 这种运动分布有利于金属凝固过程的传热和传质<sup>[5]</sup>。

### 1.2.2 电磁制动原理

电磁制动亦称电磁阀 (electromagnetic brake, EMBR)。在恒稳直流电磁场发生器通入直流电后会产生一个恒稳静态电磁场, 当金属液流经此恒稳静态电磁场时, 由于金属液切割磁力线, 在金属液内部会产生感应电流, 液态金属作为载流导体, 在外加静态磁场的作用下产生一个与金属液流动速度方向相反的制动力。电磁制动力的产生基于两个基本定律:

一是运动着的导电金属液与磁场相互作用产生感应电流:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{V} \times \mathbf{B} = (\sigma V B_z, 0, 0) \quad (1)$$

二是载流金属液与磁场相互作用产生电磁力:

$$\mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B} = (0, -J_x B_z, 0) = (0, -\sigma V B_z^2, 0) \quad (2)$$

式中,  $\mathbf{B}$  为磁感应强度矢量,  $\mathbf{F}$  为电磁力矢量,  $\sigma$  为电导率,  $\mathbf{V}$  为流体的流动速度,  $\mathbf{J}$  为感应电流。由式 (2) 可知, 在稳恒磁场作用下, 液态金属受到的电磁力的方向与金属液的运动方向相反, 对金属液的运动起到抑制作用<sup>[6]</sup>。

## 1.3 实验方法

首先, 将 K417 镍基高温合金炉料装入真空中频感应熔炼炉中, 抽真空, 当真空中频感应熔炼炉的真空度达到  $6 \times 10^{-2}$  Pa 时通电加热、熔化和精炼, 精炼温度 1823 K, 精炼时间 60 min。

精炼后, 将温度降至 1723 K 的 K417 高温合金熔液通过带有泡沫陶瓷过滤器的浇冒口系统浇注到奥氏体不锈钢锭模中, 当金属液液面和条形恒稳直流电磁场发生器中心面平齐时停止浇注, 分别接通条形恒稳直流电磁场发生器、工频交流旋转电磁场发生器的电源, 60 s 后, 依次断开工频交流旋转电磁场发生器、条形恒稳直流电磁场发生器的电源, 120 min 后破真空取锭。实验过程中通过调整工频交流旋转电磁场发生器、条形恒稳直流电磁场发生器各自输入的励磁电流的大小对其产生的电磁场的强度进行控制。

试样的宏观晶粒组织采用  $15\text{gCuSO}_4 + 3.5\text{mL H}_2\text{SO}_4 + 50\text{ mL HCl}$  混合溶液腐蚀得到。根据国标 GB6394-86《金属平均晶粒尺寸测定法》中的截点法来测定晶粒尺寸。采用面积计量法测定断面等轴晶比例。采用数码相机记录不同工艺条件下 K417 高温合金铸锭的表面形貌。

## 2 结果与分析

### 2.1 复合电磁场对高温合金铸锭表面形貌的影响

图 2 为采用数码相机记录不同工艺条件下 K417 高温合金铸锭的表面形貌。试验过程中发现, 在高温合金锭凝固过程中未施加复合电磁场时, 金属液面没有波动, 凝固后高温合金铸锭的表面比较平整, 如图 2a 所示。当在高温合金锭凝固过程中仅施加 60 A 的旋转电磁场时, 金属液面涡旋状的波动较大, 凝固后高温合金铸锭的表面呈现较深的中心凹陷, 如图 2b 所示。当在高温合金锭凝固过程中施加 60 A 的旋转电磁场的同时在金属液面处施加 150 A 的恒稳直流电磁场时, 金属液面涡旋状的波动减轻, 凝固后高温合金铸锭表面中心凹陷的深度减小, 如图 2c 所示。当在高温合金锭凝固过程中施加 60 A 旋转电磁场的同时在金属液面处施加 290 A 恒稳直流电磁场时, 金属液面只有轻微波动, 凝固后高温合金铸锭表面没有出现中心凹陷, 如图 2d 所示。

图 3 为电磁制动影响金属液面波动的示意图。当金属液面处没有施加电磁制动时, 在工频交流旋转电磁场发生器通入三相交流电后会产一个旋转磁场, 置于旋转磁场内的液态金属将产生感生电流, 液态金属作为载流导体, 在外加旋转磁场的作用下产生电磁力  $F_1$ , 电磁力  $F_1$  驱动液态金属沿旋转磁场方向进行旋转运动。因此当在高温合金锭凝固过程中仅施加 60 A

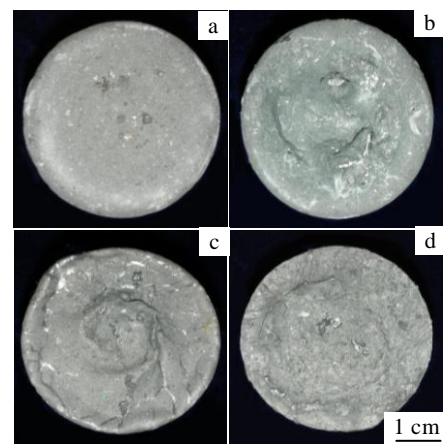


图 2 不同工艺条件下 K417 高温合金铸锭的表面形貌  
Fig.2 Surface topography of K417 superalloy ingots: (a)  $I_{DC} = 0$ ,

$I_{AC} = 0$ ; (b)  $I_{DC} = 0, I_{AC} = 60$  A; (c)  $I_{DC} = 150$  A,  $I_{AC} = 60$  A; (d)  $I_{DC} = 290$  A,  $I_{AC} = 60$  A

的旋转电磁场时，金属液在电磁力的作用下沿着模壁攀升，导致金属液面产生较大的涡旋状波动，凝固后高温合金铸锭的表面呈现较深的中心凹陷。

当在金属液面处施加电磁制动时，虽然旋转电磁场在金属液中产生的电磁力  $F_1$  也能引起金属液产生旋转运动并引起金属液面波动，但在金属液面处，金属液流经此处的恒稳直流电磁场时，由于金属液切割磁力线，在金属液内部会产生感应电流，液态金属作为载流导体，在外加恒稳磁场的作用下产生一个与金属液流速  $V$  方向相反的电磁制动力  $F_2$ ，这将抑制金属液的流动，使金属液面的波动减轻，凝固后高温合金铸锭表面中心凹陷的深度减小。随着恒稳磁场强度的增加，其在金属液面处产生的电磁制动力  $F_2$  增大，电磁制动的效果越明显。在本实验条件下，当恒稳直流电磁场的强度增加到 290 A 时，其在金属液面处产生的电磁制动效应可以抑制 60 A 旋转电磁场所产生的金属液面的波动，因此凝固后高温合金铸锭表面没有出现中心凹陷。

### 2.2 复合电磁场对高温合金锭缩孔的影响

图 4 为 K417 高温合金锭的缩孔分布情况。图 4a 为浇注完毕立刻施加 60 A 旋转电磁场时，距铸锭表面 60 mm 处横截面的缩孔分布情况，可以看出，缩孔非常严重，数量较多且分布集中、尺寸较大。分析其原因，施加旋转电磁场引起的金属液面波动太大，金属液在电磁力的作用下沿着模壁攀升后首先凝固形成大飞边，从而恶化了铸锭的补缩条件。图 4b 为浇注完毕后施加 60 A 旋转电磁场的同时在金属液面处施加 290 A 的恒稳直流电磁场时，距铸锭表面 60 mm 处横截面的缩孔分布情况，可以看出，缩孔得到明显改善，数量较少且分散、尺寸也较小。分析其原因，当在金属液面处施加 290 A 恒稳直流电磁场时，其在金属液面处产生的电磁制动效应可以抑制在高温合金液中施加 60 A 旋转电磁场所产生的金属液面的波动，从而改善

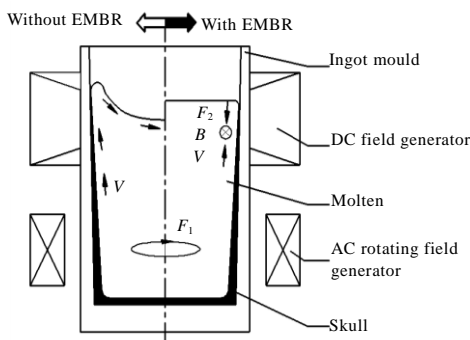


图 3 电磁制动影响金属液面波动的示意图

Fig.3 Influence of EMBR on metal surface fluctuation

了铸锭的补缩条件。

### 2.3 复合电磁场对高温合金锭宏观晶粒组织的影响

图 5 为不同工艺条件下 K417 高温合金铸锭横断面的宏观晶粒组织。在高温合金锭凝固过程中未施加复合电磁场时，高温合金铸锭从外向内呈现典型的 3 层不同晶区：表层细晶粒区、柱状晶粒区和中心粗等轴晶粒区，中心等轴晶的平均晶粒尺寸为 2.85 mm，断面等轴晶比例为 67%，如图 5a 所示。当浇注 10 s 后施加 60 A 的旋转电磁场时，高温合金铸锭从外向内仍然呈现典型的 3 层不同晶区，但中心部等轴晶区的晶粒组织得到明显细化和增加，其平均晶粒尺寸细化到 0.78 mm，断面等轴晶比例增加至 75%，如图 5b 所示。当浇注完毕后立即施加 60 A 旋转电磁场和 290 A 恒稳直流电磁场时，得到的高温合金铸锭只有表层细晶粒区和中心等轴晶粒区两个晶区，断面等轴晶比例增加至 96%，如图 5c 所示。

从图 5 的实验结果可知，在高温合金真空熔铸过程中施加旋转电磁场，可以使高温合金铸锭的等轴晶组织得到明显的细化，其机理可以归结为电磁场作用下熔体中结晶核心的增殖和枝晶生长的抑制<sup>[7,8]</sup>。

从图 5b 的实验结果可知，在浇注 10 s 后再施加 60 A 旋转电磁场的工艺条件下，虽然可以保证金属液面能够在电磁搅拌之前形成稳定的表面凝壳，避免因金属液面波动太大引起铸锭补缩条件的恶化，得到缩孔更加严重的铸锭，但却导致旋转电磁场在金属液凝固过程中的作用范围和效果有限，铸锭凝固组织中细小等轴晶粒区被局限在 75% 的比例范围内，高温合金铸锭总会存在一个在施加电磁场之前就已凝固形成的粗大柱状晶粒区。

从图 5c 的实验结果可知，在浇注完毕后同时施加 60 A 旋转电磁场和 290 A 恒稳直流电磁场的条件下，由于 290 A 恒稳直流电磁场在金属液面处产生的电磁制动效应可以抑制施加 60 A 旋转电磁场所引起的金属液面的波动，因此不仅避免了因金属液面波动太大而使铸锭缩孔恶化的情况出现，而且大幅提高了旋转

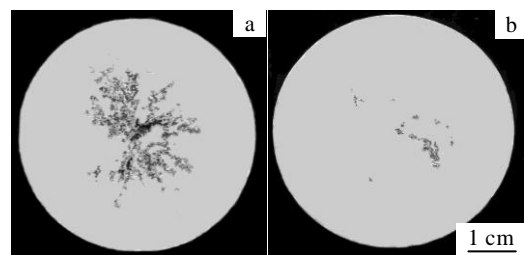


图 4 K417 高温合金锭的凝固情况

Fig 4 Solidification phenomena of K417 superalloy ingots:

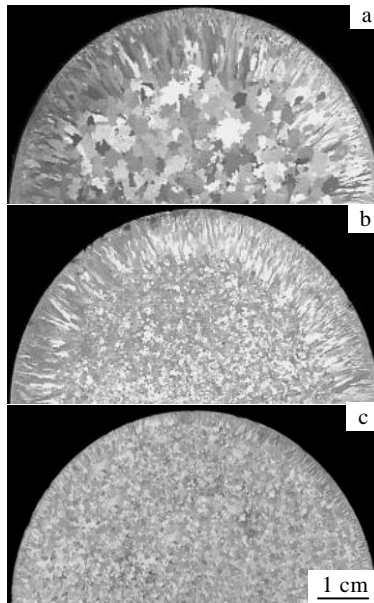
(a)  $I_{DC} = 0, I_{AC} = 60$  A; (b)  $I_{DC} = 290$  A,  $I_{AC} = 60$  A

图5 K417 高温合金锭横断面的宏观组织

Fig.5 Macrostructure of cross section of K417 superalloy ingots:

(a)  $I_{DC} = 0, I_{AC} = 0$ ; (b)  $I_{DC} = 0, I_{AC} = 60$  A; (c)  $I_{DC} = 290$  A,  $I_{AC} = 60$  A

电磁场在金属液凝固过程中的作用范围和效果, 最终得到细小等轴晶比例达到 96%、缩孔明显改善的优质高温合金铸锭。

### 3 结 论

1) 在高温合金真空熔铸过程中, 当浇注完毕后立即施加 60 A 的旋转电磁场时, 金属液面将会产生较大的涡旋状波动, 这将恶化铸锭凝固过程中的补缩条件, 导致凝固后高温合金铸锭的表面呈现较深的中心凹

陷, 铸锭内部的缩孔比较严重。

2) 在本实验条件下, 当浇注完毕后同时施加 60 A 旋转电磁场和 290 A 恒稳直流电磁场时, 由于恒稳直流电磁场在金属液面处产生的电磁制动效应可以抑制施加旋转电磁场所引起的金属液面的波动, 因此不仅避免了因金属液面波动太大而使铸锭缩孔恶化的情况出现, 而且大幅提高了旋转电磁场在金属液凝固过程中的作用范围和效果, 最终得到细小等轴晶比例达到 96%、缩孔明显改善的优质高温合金铸锭。

### 参考文献 References

- [1] Liu Baicao(刘佰操). *Cast Nonferrous Alloy*(铸造非铁合金)[M]. Beijing: China Machine Press, 2003
- [2] Jin Wenzhong(金文中), Li Tingju(李廷举), Yin Guomao(殷国茂). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程) [J], 2007, 36(4): 705
- [3] Zhang Qi(张琦), Li Tingju(李廷举), Wang Tongmin(王同敏) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程) [J], 2007, 36(9): 1566
- [4] Li T J, Li X T, Zhang Z F et al. *Ironmaking and Steelmaking* [J], 2006, 33(1): 57
- [5] Jia Guanglin(贾光霖), Pang Weicheng(庞维成). *Principle and Technology of Electromagnetic Metallurgy* (电磁冶金原理与工艺)[M]. Shenyang: Northeastern University Press, 2003
- [6] Sun Jianbo(孙建波). *Studies on Continuous Casting of Cladding Aluminum Alloys*(复层铝合金铸坯连续铸造技术研究)[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011
- [7] Jin Wenzhong(金文中), Li Tingju(李廷举), Yin Guomao(殷国茂). *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程) [J], 2008, 37(5): 784
- [8] Yan Z M, Jin W Z, Li T J. *Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2012, 21(9): 1970

## Vacuum Casting of Superalloy Ingots with Multi-electromagnetic Field

Jin Wenzhong<sup>1</sup>, Li Sufang<sup>1</sup>, Li Tingju<sup>2</sup>, Yin Guomao<sup>2</sup>

(1. Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

(2. Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** The effect of multi-electromagnetic field on the K417 superalloy ingots solidification microstructure has been studied. The results show that during the solidification process of superalloy vacuum casting, the application of the multi-electromagnetic field, composed of rotary electromagnetic field with 60 A current and steady DC electromagnetic field with 290 A current, can increase the scope and effect of rotary electromagnetic field as well as improve the feeding conditions of ingots. The reason can be attributed to that the electromagnetic brake generated by DC electromagnetic field can suppress effectively the metal surface fluctuation generated by rotary electromagnetic field. As a result, the fine equiaxed grain fraction of ingots can be increased to 96 % and the shrinkage porosity of ingots can be greatly reduced.

**Key words:** multi-electromagnetic field; superalloy ingots; vacuum casting; electromagnetic brake; shrinkage porosity

China, E-mail: wenzhong\_jin0872@sina.com