

# 电磁场对离心铸造 Hastelloy C 凝固组织的影响

## The Influence of Electromagnetic Field on the Solidification Structure of Centrifugal Casting Hastelloy C

郭明虎, 杨院生, 花福安, 郭大勇, 贺幼良, 胡壮麒 (中国科学院金属研究所, 沈阳 110016)

GUO Ming-hu, YANG Yuan-sheng, HU A Fu-an, GUO Da-yong, HE You-liang, HU Zhuang-qi  
(Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

**摘要:** 研究了 Hastelloy C 电磁离心铸管的凝固组织。结果表明, 电磁离心铸造有利于等轴晶的生成, 且随着磁场强度增加, 等轴晶含量增多。这种柱状晶-等轴晶转变 (CET) 可解释为: 电磁场作用下, 熔体流动, 对枝晶产生冲刷进而折断。此外, 电磁场可以细化微观组织, 一次枝晶间距随着磁场强度增加而减小, 其结果与 Jackson-Hunt 模型相一致。

**关键词:** 电磁离心; Hastelloy 合金; 凝固组织; 柱状晶-等轴晶转变

中图分类号: TG146.1; TG249.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381 (2002) 09-0007-003

**Abstract:** The solidification structures of Hastelloy C tubes produced by electromagnetic centrifugal casting (EMCC) process were studied. The results show that the EMCC promotes the formation of equiaxed grains. With the increase of electromagnetic field intensity, the percentage of equiaxed grains increases. The columnar-equiaxed transition is caused by the melt flow that scours dendrite arms and breaks them off under the effects of electromagnetic field. Furthermore, the electromagnetic field decreases the prime dendrite arm spacing (PDAS). The experimental results are consistent with Jackson-Hunt model.

**Key words:** electromagnetic centrifugal casting; Hastelloy alloy; solidification structure; columnar-equiaxed transition (CET)

应用磁流体动力学 (Magnetohydrodynamics, MHD) 来控制凝固过程, 使金属铸造和单晶生长工艺产生了重大革新<sup>[1-3]</sup>。在离心铸造中应用 MHD, 即给旋转的液态金属施加稳恒电磁场, 构成电磁离心铸造工艺 (EMCC, Electromagnetic central casting)<sup>[4,5]</sup>。其特点是在保持离心铸造的同时, 获得电磁搅拌的冶金效果。电磁离心铸造在管材生产方面, 体现了独特的优越性, 对于耐热钢的研究表明, 利用 EMCC 方法生产的铸管组织致密, 缩孔和夹杂明显减少, 显微组织细化。由于凝固组织的改善大幅度提高了铸管的综合力学性能<sup>[6-10]</sup>。

Hastelloy C 是固溶强化型镍基合金, 具有较好的抗氧化和抗腐蚀性。本工作利用电磁离心铸造方法制备了 Hastelloy C 合金, 研究了合金的宏观和微观凝固组织, 分析了电磁作用对凝固组织、柱状晶-等轴晶转变和对枝晶间距的影响。

## 1 实验方法

实验材料为真空熔炼 Hastelloy C 合金, 其化学

成分 (质量分数, %) 为: Ni 基体, Cr14~17, Mo16~18, W3.0~4.5, C 0.03, Mn 1.0, Si 0.7, S 0.02, P 0.03, 其余 4~7。把 2kg Hastelloy C 母合金放入感应炉中加热重熔, 浇注入如图 1 所示的旋转铸模中。整个过程都采用氩气保护。离心机转速为 1600r/min, 浇注温度为 1500℃。通过改变励磁线圈电流强度来控制磁场强度, 实验采用的电流强度分别为 0A, 9A, 12A, 15A, 21A。电磁离心凝固后的铸管尺寸为: 长度 80mm, 外径 78mm, 内径 50mm。在铸件中部截取试样, 研磨、抛光后用 FeCl<sub>3</sub> 盐酸水溶液腐蚀, 用光学显微镜观察其组织, 用截线法测量凝固枝晶间距。

## 2 实验结果

### 2.1 Hastelloy C 的宏观凝固组织

图 2 为 Hastelloy C 合金的宏观凝固组织。图 2a 是没有施加电磁场的凝固组织, 由外层细小等轴晶和中间柱状晶及内层粗大等轴晶构成, 图 2b, c 是施加电磁场凝固组织, 最外层并无常规铸造的细小等轴晶

区,且内层等轴晶显著增多。随着磁场强度增加,内层晶所占百分比增多,如图3所示。

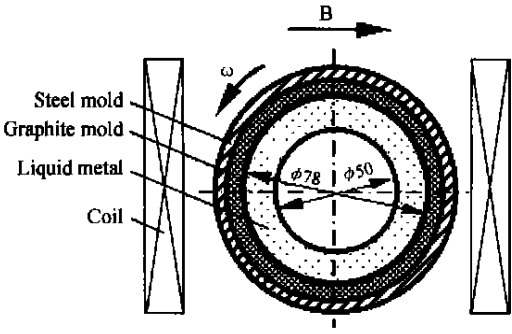


图 1 电磁离心铸造示意图  
Fig. 1 Schematic illustration of electromagnetic centrifugal casting

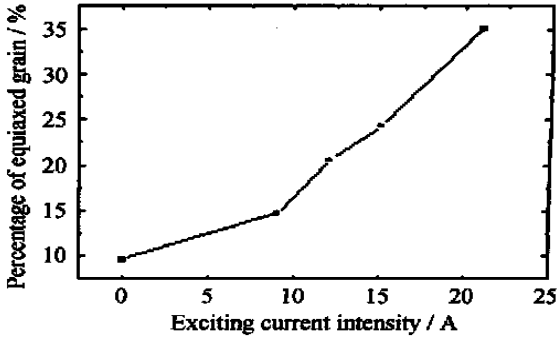


图 3 磁场强度对内层等轴晶所占百分比的影响  
Fig. 3 Effect of electromagnetic intensity on percentage of equiaxed grains in inner region

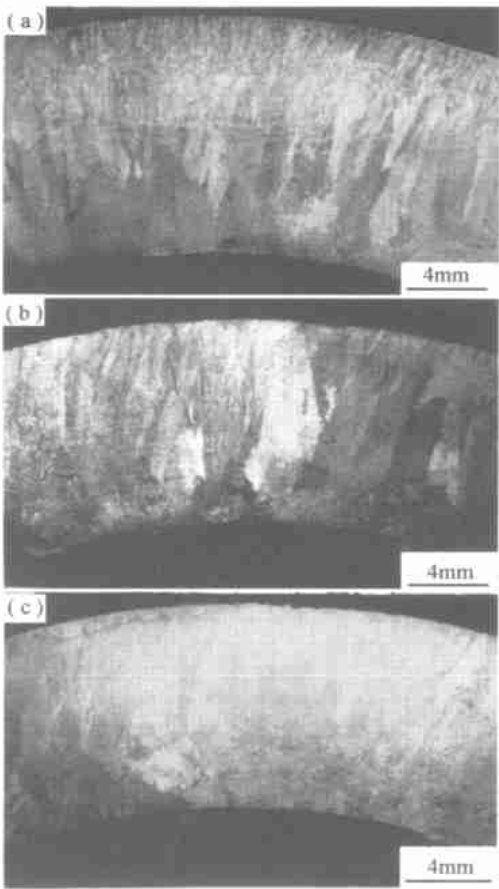


图 2 电磁离心铸管横截面宏观组织  
(a)  $I = 0A$ ; (b)  $I = 12A$  and (c)  $I = 21A$   
Fig. 2 Macrostructures of electromagnetic centrifugal casting tubes (a) without electromagnetic field, (b) with electric current 12A and (c) with 21A

2.2 对微观组织的影响

图 4 是不同磁场作用下的微观组织, 电磁场有利

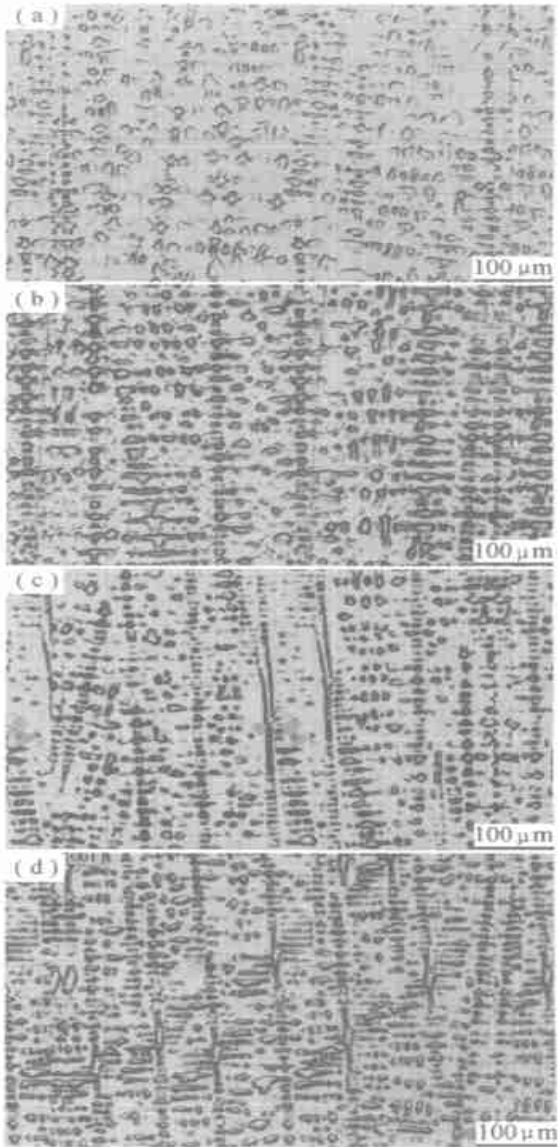


图 4 不同磁场作用下的微观组织  
(a)  $I = 0A$ ; (b)  $I = 9A$ ; (c)  $I = 15A$  and (d)  $I = 21A$   
Fig. 4 Microstructures of tubes cast by EMCC

于柱状晶区一次枝晶间距的减小, 随着磁场强度增加, 一次枝晶间距显著减小。采用截线法测量一次枝晶间距, 如图 5 所示。

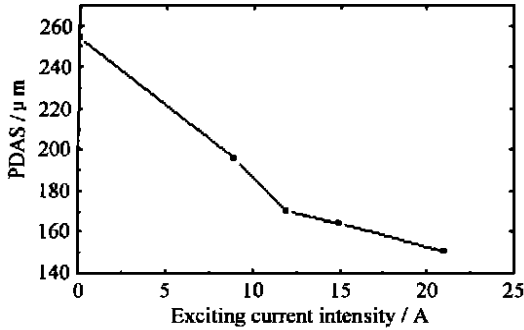


图 5 磁场强度对一次枝晶间距的影响

Fig. 5 Effect of electromagnetic intensity on prime dendrite arm space

### 3 分析与讨论

电磁离心铸造中, 熔体在电磁场中运动时, 会受到 Lorentz 力的作用。在极坐标系中, Lorentz 力的作用可分解为沿径向和切向的两个分量<sup>[6]</sup>, 它们分别是:

$$F_{\text{径},e} = -\sigma\omega B^2 \sin\omega \cos\omega \quad (1)$$

$$F_{\text{切},e} = -\sigma\omega B^2 (\sin\omega)^2 \quad (2)$$

式中,  $r$  为液态金属断面半径 (m);  $\omega$  为铸模转速 ( $r/\text{min}$ );  $t$  为时间 (s);  $B$  为磁感应强度 (T);  $\sigma$  为电导率 ( $\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ )。

切向分力与熔体运动方向相反, 将迫使固液界面前的熔体产生流动。在凝固初期, 会在模壁上生成许多小核心, 这些晶核在电磁力的作用下, 大部分发生游离。随着凝固的进行, 熔体温度很快降低, 使得沿模壁的晶粒迅速张大, 形成柱状晶区。在凝固后期, 热量传输速度降低, 凝固速度减缓。流体对枝晶端部产生很大的冲刷作用, 如果剪切应力大于枝晶的抗弯强度, 枝晶就会折断<sup>[11]</sup>。在柱状晶区二次枝晶生长时, 会产生溶质富集。由成分过冷理论知, 溶质富集区将使一次枝晶发生“颈缩”。同时, 界面处温度波动较大, 会使枝臂重熔<sup>[12]</sup>。这些都为枝晶断裂提供了条件。这些折断的枝晶会被带到熔体深处, 这个过程会发生重熔现象。残存的枝晶碎片会成为形核核心, 以等轴晶方式长大, 形成等轴晶区。当磁场强度较小时, 仅有部分细小的枝晶被折断, 形成等轴晶核较少。随着磁场强度的增大, 有越来越多的枝晶碎片游离、富集, 等轴晶区也随之增大。EMCC 中的柱状晶-等轴晶转变可用示意图 6 表示。开始时枝晶沿模壁生长 (图 6a),

随后枝晶沿铸型旋转方向倾斜生长 (图 6b), 倾斜枝晶在流体的冲刷下发生折断 (图 6c), 这些折断的枝晶被流体带到熔体深处以等轴晶方式长大 (图 6d)。

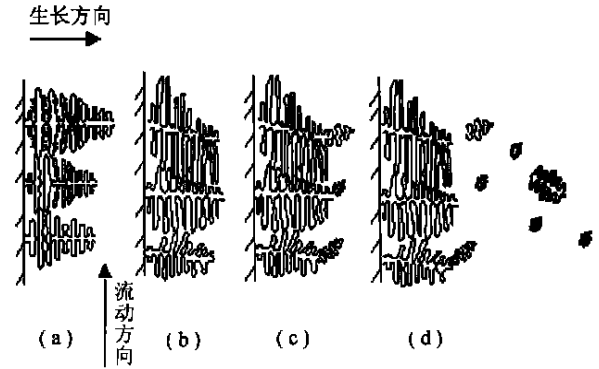


图 6 柱状晶向等轴晶转变机制

Fig. 6 The illustration of mechanism of columnar-equiaxed transition

在电磁离心铸造过程中, 热量主要由铸壁散失。同时由于离心力的作用, 加强了熔体和模壁的接触, 加快了传热。铸件沿径向形成了较大温度梯度, 因而熔体的凝固是单向凝固。刚开始较多核心同时生长, 最大生长方向与热流方向平行的那些晶体抑制了相邻的晶体长大而优先生长。随着其磁场强度的增大, 熔体流动速度加快, 促进了溶质和热量的传递, 加快晶体的生长。同时, 由于动量边界层的存在将减小热边界层厚度, 增加界面处的温度梯度<sup>[13]</sup>。Jackson-Hunt 提出的定向凝固组织中一次枝晶间距模型如下式所示:

$$\lambda_1 = A G_T^{-1/2} R^{-1/4} \quad (3)$$

式中,  $\lambda_1$  为一次枝晶间距,  $G_T$  为温度梯度;  $R$  为生长速度。

按照 Jackson-Hunt 模型, 生长速度、温度梯度的增加促使一次枝晶间距减小。这与图 5 所示的实验结果相一致。而一次、二次枝晶间距的减小在很大程度上将提高材料的力学性能。

### 4 结论

(1) 电磁离心铸造使 Hastelloy C 合金凝固组织中等轴晶增加, 且随着磁场的增强, 等轴晶增多。

(2) 电磁离心铸造中 CET 转变机制是凝固过程中的柱状晶发生折断, 电磁场产生的切向力可以促使柱状晶向等轴晶的转变。

(3) 电磁离心铸造细化了 Hastelloy C 合金微观组织。随着磁场强度增加, 一次枝晶间距降低。

(下转第 43 页)

Nd 加入量为 1.0~4.0mg, 测得值: Mo 为 6.03, 5.94, 6.03, 6.05, 6.02mg (加入量为 6.00mg); Ti 为 2.99, 2.93, 3.02, 2.99, 2.99mg (加入量为 3.00mg), 均与加入量一致。故本试验选用 Nd 的加入量为 1.0mg。

### 3.5 试样分析结果

按表 2 和表 3 配制高标溶液。按试验方法分析试样的结果列于表 3。

分析表 4 的试验数据可知, 上述 7 元素的精密度和加入回收结果是较满意的。MP159 中铌、钼、铝、钛的测量值同 A 厂和 B 厂复验的测得值是很接近的。DZ-40G 中钨的测量值同化学法 (HB5220.36-95) 的测定值一致; GH188 中钨的测量值同化学法 (HB5220.43-95) 的测定值一致。

## 3 结论

(1) 本文采用 ICP-AES 法测定钴基高温合金中 Nb, Ta, Zr, Mo, Al, Ti, La 结果的精密度和加入回收试验结果符合成分分析要求。

(2) 复验结果和用航标化学法对照结果可知, ICP-AES 法测定值是准确的, 可用于钴基高温合金中上述 7 种元素的测试。

### 参考文献

- [1] M 汤普森, J M 沃尔什. ICP 光谱分析指南 [M]. 符斌, 殷欣平译. 北京: 冶金工业出版社, 1991.3.
- [2] 陈寿椿. 重要无机化学反应 (第三版). 上海: 上海科学技术出版社, 1994.
- [3] 郑建国, 周勤, 钱浩雯, 张展霞. 分析测试学报, 1993, 12 (5): 7.

收稿日期: 2000-12-08; 修订日期: 2002-03-03

作者简介: 刘文虎 (1938-), 男, 研究员, 联系地址: 北京市 81 信箱 21 分箱 (100095)。

\* \* \* \* \*

(上接第 9 页)

### 参考文献

- [1] Takeuchi E, et al. Magnetohydrodynamics in Process Metallurgy [M]. Warrendale, PA: TMS, 1992.
- [2] Asai S. Metallurgical Aspects of Electromagnetic Processing of Materials in Liquid Metal Magnetohydrodynamics [M]. MA: Kluwer Academic Publishers, 1989.
- [3] Series R W and Hurle D T J. The use of Magnetic Fields in Semiconductor Crystal Growth [J]. J Crystal Growth, 1991, 113: 305.

- [4] 葛云龙, 杨院生, 焦玉宁, 等. 金属学报, 1993, 29 (3): B134.
- [5] 杨院生, 刘清民, 焦玉宁, 等. 金属学报, 1994, 30 (5): B209.
- [6] Yang Y S, Liu Q M, Jiao Y N, et al. Application of Steady Magnetic Field for Refining Solidification Structure and Enhancing Mechanical Properties of 25Cr-20Ni-Fe-C Alloy in Centrifugal Casting [J]. ISIJ int, 1995; 35 (4): 389.
- [7] Wu X Q, Zhan Q, Yang Y S, Hu Z Q. Difference in As-cast Structures of Centrifugal Casting Heat-resistant Alloy Caused by Exerted Electromagnetic Field and Cooling Conditions [J]. J Mater Sci Let, 1998; 17: 1403.
- [8] Wu X Q, Yang Y S, Zhang J S, et al. Structure Characteristics in Industrially Centrifugally cast 25Cr20Ni Stainless Steel Tubes Solidified under Different Electromagnetic Field Intensity [J]. J Mater Eng Performance, 1999; 8 (5): 525.
- [9] Yang Y S, Hu Z Q. Solidification of Alloys in Electromagnetic Field [J]. Z Metallkde, 2000; 91 (4): 280.
- [10] Nakada M, Shiohara Y, Flemings M C. Modification of Solidification Structures by Pulse Electric Discharging [J]. ISIJ int, 1990; 30 (1): 27.
- [11] 干勇, 仇圣桃, 萧泽强. 连续铸钢过程数学物理模拟 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001.
- [12] Kurz W, Fisher D J. Fundamentals of Solidification [M]. Lausanne-Switzerland: Trans Tech Publications, 1984.

基金项目: 国家自然科学基金重大项目 (项目编号: 59995440-4)

收稿日期: 2002-01-25; 修订日期: 2002-06-25

作者简介: 郭明虎 (1974-), 男, 湖北枣阳人, 硕士, 研究方向为金属凝固控制与组织性能, 联系地址: 中国科学院金属研究所高温合金研究室 (110016)。

\* \* \* \* \*

## NASA 在太空进行材料试验

作为 NASA 国际空间站材料试验的一部分, 有数百种材料将接受太空环境的考验。太空中有极端的紫外线辐射, 原子氧, 高度真空和其它污染, 对某些材料有严重的降质作用。这是地球上的材料试验室很难完全模拟的。这些材料在太空环境暴露 6 个月以后返回地球, 研究人员将确定太空环境对这些将用于制造空间飞行器的先进材料有哪些影响。其目的在于发展用未来航天器的先进材料和延长多次返回地球的材料的使用寿命。例如, 在太空试验的涂料是暴露在高剂量的太阳紫外线辐射和其它辐射中, 而地球上的涂料只受到低水平辐射, 这样的研究有利于发展随时间延长而很少降质的涂料。被搭载进行试验的材料包括: 太阳能电池, 空间飞行器防护层, 热控制材料, 光学材料, 润滑材料, 各种涂料和涂层等。人们对其中三个超薄磁带样品很感兴趣, 因为它们与一次性使用的推进器小型开伞系统的磁带类似。

(全宏声)