

# 镍基高温合金铸件的晶粒组织控制 ——铸造工艺参数的影响

刘 林

(西北工业大学应用物理系, 西安, 710072)

## GRAIN STRUCTURE CONTROL OF NICKEL-BASE SUPERALLOYS IN CASTING PROCESSES: EFFECT OF FOUNDRY VARIABLES

Liu Lin

(Department of Applied Physics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, 710072)

**摘 要** 以 IN 738 LC 合金为例, 研究了镍基高温合金在各种铸造工艺条件下的晶粒组织。结果表明, 降低合金液均匀化处理温度可以明显细化冷凝后  $\gamma$  基体的晶粒。在浇注温度、铸型预热温度以及合金液均匀化处理温度等铸造工艺参数中, 后者对晶粒尺寸的影响大于前两者。

**关键词** 高温合金, 晶粒度, 碳化物

**中图分类号** V261.31, TG132.32, TG21,

**Abstract** Grain structures of nickel-base superalloy IN738LC are investigated under various casting conditions. It is found that grain size of  $\gamma$  matrix and dimension of MC carbides reduce obviously by lowering the temperature of melt homogeneous treatment. The mechanism of grain refinement can be the existence of a number of unmelted MC particles that serve as the substrata of nonspontaneous nucleation of  $\gamma$  matrix during freezing. By comparing melt pouring temperature, mold preheating temperature with melt homogeneous treatment temperature, it can be concluded that the last one plays a more predominant role on the grain structures than the first two. Therefore, one of the effective methods of refining grain structures is via controlling the melt homogeneous temperature.

**Key words** heat resistant alloys, grain size, carbides

高温合金精铸件的铸态组织易出现粗大的不均匀晶粒, 降低了涡轮叶片和涡轮盘等部件的疲劳性能及可靠性。近年来, 一些新的铸造技术<sup>(1~3)</sup>可以达到非常细的晶粒并使组织均匀化。其中控制铸造参数是细化晶粒的有效方法。

铸造参数意指对熔体和冷凝过程中的热流加以控制的参数, 包括铸型预热温度、合金液浇注温度和熔体的均匀化处理温度等。在高温合金熔铸过程中, 一般须将熔体加热至合金液相线温度以上约 200℃保温一段时间, 使合金液均匀化, 均匀化处理过程对合金的晶粒组织有影响<sup>(4)</sup>。

本文考察了各种铸造参数对 IN738LC 镍基高温合金凝固组织的影响, 并分析了在各种条件下晶粒细化的机理。

1993年4月5日收到, 1993年8月2日收到修改稿

## 1 实验材料及方法

采用 IN738LC 镍基高温合金, 其化学成份为(wt%): 0.09C, 16.0Cr, 8.5Co, 2.6W, 1.7Mo, 3.4Al, 3.4Ti, 0.9Nb, 1.8Ta, 0.01B, 0.04Zr, 余量 Ni。使用 VSG10 型中频真空感应炉制备样品, 装入母合金重量约为 600g。合金经不同的工艺熔化后, 浇入经预热的钢模或陶瓷模内。采用金相检验方法测定铸件中晶粒的大小。由 DSM-950 型数字式扫描电镜分析样品的显微组织和微区成份。

## 2 实验结果及分析

### 2.1 熔体的不同处理状态对晶粒组织的影响

合金熔化后过热至 1550℃ 保持 5~10min 然后降至 1450~1350℃ 浇注, 或者不经均匀化处理熔化至浇注温度后直接浇注。两种工艺均采用预热至 900℃ 的陶瓷模。在不同的处理条件下的晶粒组织如图 1 所示。

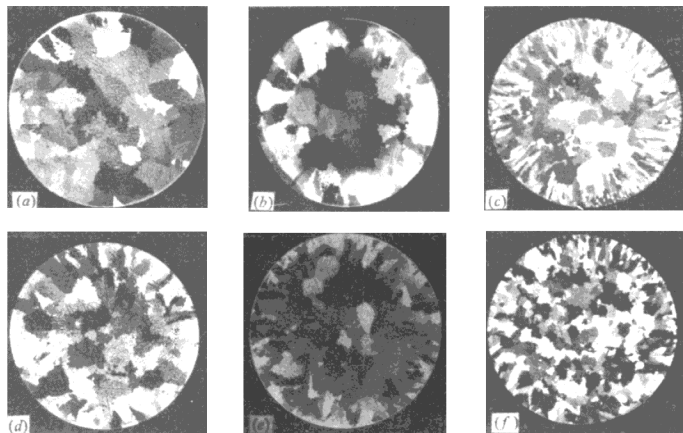


图 1 熔体不同处理工艺对 IN738LC 合金晶粒组织的影响 ×1

(a), (b), ..., (f) 的铸造参数及组织特征见下表

图 号	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
浇注温度/℃	1450	1400	1350	1450	1400	1350
均匀化温度/℃	1550	1550	1550	1450	1400	1350
平均晶粒尺寸/mm	4.4	4.3	3.4	3.3	3.1	2.2
等轴晶比例/%	51	47	52	62	60	63
工 艺	经均匀化处理后浇注			未经均匀化处理直接浇注		

从图1中看出, 随着浇注温度的降低, 等轴晶尺寸明显减小, 但铸件断面上等轴晶的比例变化不大; 当浇注温度较高时, 对晶粒尺寸的影响不明显; 而当浇注温度降至合金液相线温度附近时, 晶粒尺寸则显著减小, 如图2所示。如果合金液未经均匀化处理后浇注, 不仅得不到细晶组织, 而且柱状晶的生长也被抑制。表明, 降低合金液的均匀化处理温度是获得细晶组织的重要方法。一些研究者<sup>[4, 5]</sup>认为使晶粒细化的机制, 存在于母合金中的初生碳化物在较低

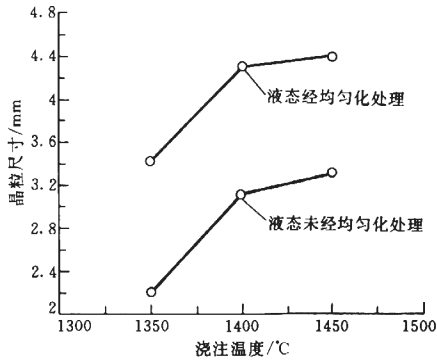


图2 等轴晶尺寸与浇注温度和均匀化处理之间的关系  
 尚未得到实验和理论上的支持。

由于初生碳化物是在凝固过程中析出的, 因此在一般凝固条件下区分未溶解的和析出的碳化物非常困难。然而快速凝固技术可以抑制碳化物的析出与生长, 使区分上述两种类型的碳化物成为可能。本研究使用一种旋翼式快速凝固装置<sup>[6]</sup>将合金液从不同的均匀化处理温度下激冷, 根据二次枝晶臂距估算<sup>[7]</sup>冷却速率可达 $10^5 \sim 10^6 \text{ } ^\circ\text{C/s}$ 。尽管初生碳化物在此条件下仍会析出, 但其尺寸已减至 $10^{-1} \mu\text{m}$ 量级。相反, 未溶解碳化物则常呈大块多面体状, 如图3所示。

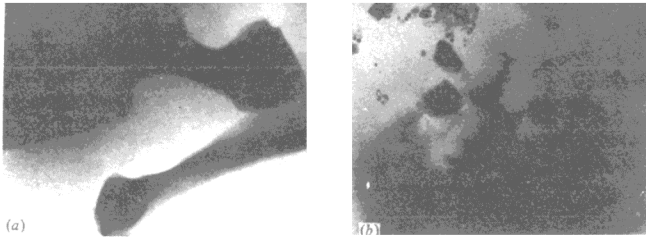


图3 急冷条件下合金中的MC型碳化物

(a) 未溶解碳化物  $\times 50\,000$ ; (b) 凝固时析出的碳化物  $\times 50\,000$

试验发现, 将试样从合金液 $1\,400\text{ } ^\circ\text{C}$ 中激冷, 可析出碳化物和未溶的碳化物并存; 从 $1\,500\text{ } ^\circ\text{C}$ 下激冷则很难发现未溶的块状碳化物。本研究证实了MC型碳化物确实不易溶于液相, 其含量及尺寸取决于液态均匀化处理的温度及时间。如果合金液只在较低的温度下

保留较短时间, 则液相中必定存在大量的未溶解 MC 型碳化物, 这些碳化物可能成为  $\gamma$  基体的结晶核心。

对于未经均匀化处理的试样, 尽管在枝晶间仍存大量初生的 MC 型碳化物, 但在  $\gamma$  基体的晶粒中心仍可发现富钛的 MC 型碳化物细小颗粒(图 4)。由于冷凝时 MC 型碳化物的析出次序在  $\gamma$  基体之后, 这些颗粒显然来自于液相未溶解的 MC 型碳化物, 冷凝时成为  $\gamma$  基体的非自发结晶核心, 从而细化了晶粒。

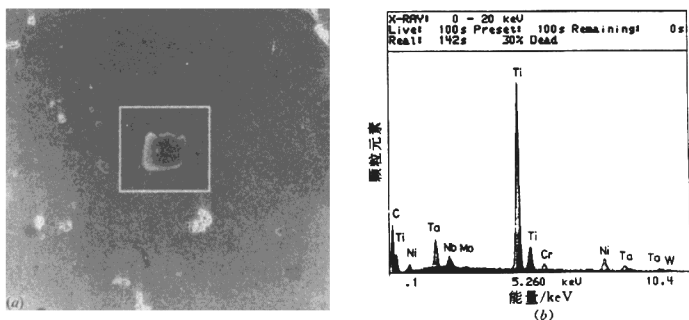


图 4 位于  $\gamma$  基体晶粒中心的 MC 型碳化物颗粒

(a) 扫描电镜照片,  $\times 1000$ ; (b) 能谱分析结果, 颗粒富钛和 C, 为富钛的 MC 型碳化物

## 2.2 铸型预热温度对晶粒组织的影响

对于钢模和陶瓷模, 铸型的预热温度对晶粒组织的作用恰好相反。如图 5 所示, 当铸型的预热温度从  $500^{\circ}\text{C}$  升高到  $900^{\circ}\text{C}$  时, 钢模中等轴晶比例减少, 而陶瓷模中的等轴晶比例增大。

钢模是一种激冷模, 其激冷能力随模温降低而增强<sup>(8)</sup>。当金属液浇入温度较低的钢模后, 在整个熔体中产生较大的过冷度, 使形核率增大, 从而增加了等轴晶的比例。

陶瓷模的激冷能力很差, 金属液在其

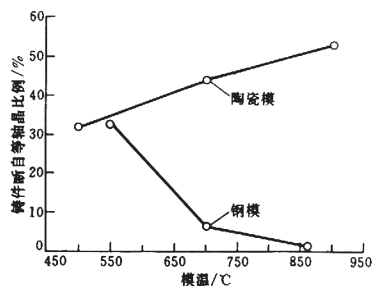


图 5 模温对铸件中等轴晶比例的影响

中的凝固时间远大于在钢模中凝固, 因此等轴晶的形成机理比在钢模中要复杂。影响其中心等轴晶区形成的主要因素是浇注初期液体强烈对流引起的枝晶碎片、柱状晶生长时的枝晶熔断和中心熔体的成份过冷。当模温较高时, 产生以下效应: ① 凝固时间延长, 从型壁生长出的枝晶被熔断的比例增加, 使游离出的枝晶碎片成为中心等轴晶核心的数目增多; ② 铸锭边缘到中心的温度梯度降低, 这将加大中心液体的成份过冷倾向。两个因素均有利于中心等轴晶区的形成, 从而增大了铸

锭中等轴晶的比例。

### 3 结 论

(1) 降低合金液的均匀化处理温度可以产生显著的晶粒细化效果。由于 MC 型碳化物的存在, 可成为冷凝时基体相的非自发结晶核心, 从而增大了形核率。

(2) 对于钢模和陶瓷模, 模温对晶粒组织的作用恰好相反: 随着模温的升高, 钢模中等轴晶比例减少, 而陶瓷模中等轴晶比例则增加。

### 参 考 文 献

- 1 Ewing B A, Groun K A. Polycrystalline grain controlled casting for rotating compressor and turbine components. In: Gell M, *et al.* eds. Superalloys 1984. The Metallurgical Society of AIME, 1984: 33-42
- 2 Nazmy M, Weiss B, Stickeler R. The effect of advanced fine grain casting technology on the static and cyclic properties of In 713C. In: High Temperature materials for Power Engineering 1990 II. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1990: 1397-1404
- 3 Lane J M. Microcast-x fine grained castings for aerospace industry. Presented at AeroMat'93 Conference, Anaheim, June 1993
- 4 Woulds M, Bonson H. Development of a conventional fine grain casting process. In: Gell M, *et al.* eds. Superalloys 1984. The Metallurgical Society of AIME, 1984: 3-12
- 5 Tien J K, Borofka J C, Casey M E. Precision cast vs wrought superalloys. J of Metals, 1986; 38(12): 13-17
- 6 Sommer F, Lang T, Predel B. Zur glasbildung von ubergangsmetallegierungen. Z Metallkde, 1987; 78(8): 596-599
- 7 Mehrabian R. Relationship of heat flow to structure in rapid solidification processing. In: Mehrabian R, Kear B H, Cohen M. eds. Rapid Solidification Processing: Principles and Technologies. Baton Rouge: Claitor's Publishing Division, 1978: 9-27
- 8 Ohno A. Solidification. Berlin: Springer-Verlag, 1978: 51