

浇注工艺对 Ni₃Al 基高温合金组织和性能的影响研究

王春钢¹, 孙长波¹, 夏鹤翔², 何金达¹, 焦军红¹, 张长日¹, 许庆彦²

(1. 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司, 辽宁沈阳 110143;

2. 清华大学材料学院, 先进成形制造教育部重点实验室, 北京 100084)

摘要: Ni₃Al基高温合金常应用于航空发动机尾喷管调节片, 服役环境恶劣。在成形过程中, 浇注工艺会影响Ni₃Al基高温合金铸件的宏观和微观组织, 进而影响合金的性能。研究了不同浇注温度和造型方式对合金组织和性能的影响, 结果表明, 随着浇注温度的升高, 合金的晶粒度和持久性能随之增加; 填砂浇注工艺下铸件的一次枝晶和二次枝晶臂间距大于单壳浇注工艺, 其共晶含量小于单壳浇注工艺。通过进一步测试发现填砂浇注工艺下试棒的拉伸性能和持久性能优于单壳浇注。

关键词: Ni₃Al; 铸造过程; 浇注工艺

Ni₃Al基高温合金熔点高、抗氧化性好, 具有良好的高温力学性能, 是航空发动机尾喷管调节片的主要结构材料^[1-4]。Ni₃Al基高温合金调节片在熔模铸造生产过程中存在浇不足(欠铸)、缩松、热变形等缺陷^[5-7], 加之其服役环境恶劣, 调节片在实际服役过程中存在使用寿命短、可靠性低等问题, 严重影响航空发动机的发展^[8-9]。

国内薛鑫等人^[10]针对调节片中的铸造裂纹和疏松缺陷进行了研究, 对铸件的浇注系统、型壳的焙烧温度等工艺参数进行了数值模拟分析, 结果表明, 浇注系统的内浇道能对铸件进行有效补缩, 有利于获得高质量的铸件。姚雷等人^[11]在密封片铸造试验中发现大量存在欠铸现象, 造成产品合格率极低, 严重制约了研发进程。他们结合铸件结构, 采用亨金法计算, 对内浇道尺寸和位置进行了优化, 最终使铸件合格率大幅提高。Zhong等人^[12]通过构建神经网络本构模型, 预测了Ni₃Al基高温合金的力学性能, 其试验结果验证了神经网络本构模型的准确性, 并发现Ni₃Al基高温合金的相变与变形程度有明显关系。

目前, 针对Ni₃Al基高温合金铸造工艺的研究相对较少, 为了探究浇注工艺对Ni₃Al基高温合金组织和性能的影响, 本文作者研究了不同浇注温度和造型方式对合金的晶粒大小、拉伸性能和持久性能的影响。

1 试验材料与方法

试验所用Ni₃Al母合金锭经ZG0.2真空感应炉中熔炼制得, 合金成分(质量分数, %)为0.06 C, 7.4Cr, 3.5 Mo, 8.0 Al, 0.8 Ti, 0.006 B, 0.3 Hf, 余量Ni。采用真空二次冶炼工艺, 在ZG0.01真空感应炉中重熔Ni₃Al母合金并浇注成试棒, 如图1所示。铸造试样为圆柱形试棒, 组织观察的取样位置如图1所示, 组织观察取于试棒中心位置。试棒的浇注工艺参数如表1所示, 浇注温度选取1 420 ℃和1 450 ℃, 造型方式分别采用填砂铸造和单壳铸造。填砂铸造和单壳铸造的区别在于, 浇注冷却时型壳是否埋入砂中。填砂铸造特指将型壳埋入砂中凝固, 散热相对较慢; 单壳铸造则指未埋入砂中, 型壳与空气直接接触, 散热较快。组织试样经抛光后, 用12 mL H₃PO₄+48 mL H₂SO₄+40 mL HNO₃腐蚀液电解腐蚀, 电压5 V, 时间约6 s。在光学显

作者简介:

王春钢(1987-), 男, 工程师, 从事熔模铸造技术研究和生产工作。E-mail: 381151889@qq.com

通讯作者:

孙长波, 男, 研究员级高级工程师。E-mail: sunchangbo@126.com

中图分类号: TG132.3⁺²

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2022)11-1353-05

收稿日期:

2022-03-10 收到初稿,
2022-05-02 收到修订稿。

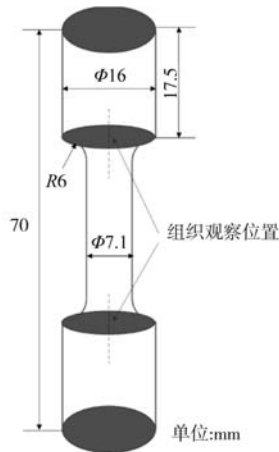


图1 组织观察取样位置

Fig.1 Sampling locations of microstructure observation

表1 浇注工艺参数
Table 1 Pouring process parameters

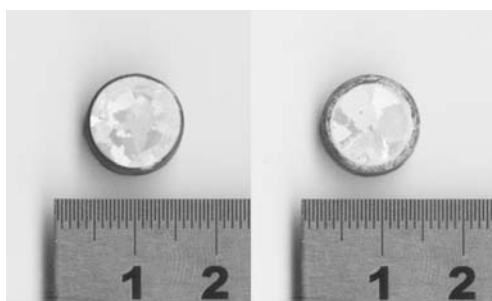
序号	浇注温度/℃	造型方式
1	1 420	填砂
2	1 450	
3	1 420	单壳
4	1 450	

显微镜和高分辨场发射扫描电镜下进行组织观察。

2 试验结果与分析

2.1 浇注工艺对合金宏观晶粒的影响

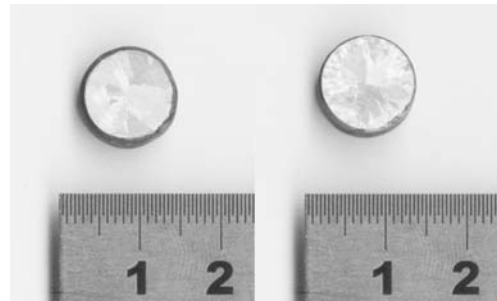
不同浇注工艺下试棒中心位置的晶粒度如图2和图3所示。当造型方式为填砂时，试棒的组织为等轴晶，铸态下试棒晶粒尺寸比较粗大。随着浇注温度的升高，试棒的平均晶粒尺寸变大，由浇注温度为1 420 ℃的2 mm增大到浇注温度为1 450 ℃的5 mm。当造型方式为单壳时，试棒的组织由等轴晶向柱状晶和柱状晶+中心等轴晶晶粒类型转变，铸态下的试棒晶粒尺寸比较细小；随着浇注温度的升高，平均晶粒尺寸有所



(a) 浇注温度1 420 ℃ (b) 浇注温度1 450 ℃

图2 造型方式为填砂

Fig. 2 The molding method is sand filling



(a) 浇注温度1 420 ℃ (b) 浇注温度1 450 ℃

图3 造型方式为单壳

Fig.3 The molding method is single shell

减小，试棒边部为细小柱状晶，中心转变为粗大等轴晶。

铸件凝固过程成分过冷判据：

$$\frac{G}{R} \geq \frac{-mC_0(1-k_0)}{Dk_0} \quad (1)$$

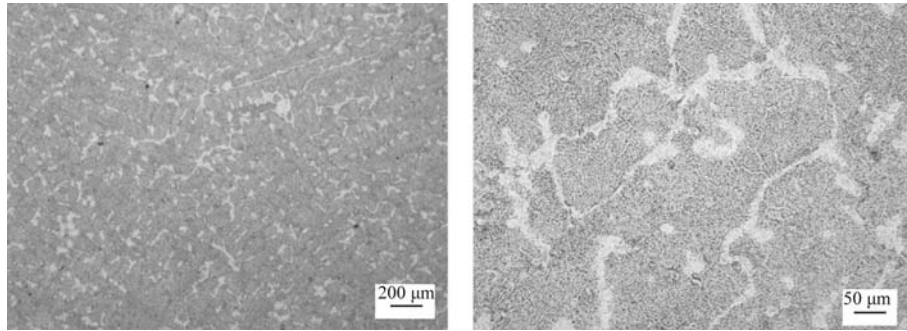
式中： G 为温度梯度； R 为晶体生长速率； m 为液相线斜率； k_0 为平衡分配系数； C_0 为溶质的原始浓度； D 为扩散系数。

由式(1)可知，大的温度梯度 G 以及小的晶体生长速率 R 将有利于柱状晶的生长，而随着浇注温度的降低，温度梯度 G 的降低以及晶体生长速率 R 的加快将有利于等轴晶的形成。当造型方式为填砂时，合金的温度梯度降低，有利于等轴晶的形成。随着浇注温度的升高，合金的凝固时间变长，有利于晶粒的长大。当造型方式为单壳时，合金的温度梯度升高，有利于柱状晶的形成。随着浇注温度升高，合金的过冷度增大，导致形核率增大，因此试棒边部的柱状晶粒更加细小，而另一方面由于浇注温度的提高，心部的凝固时间增长，晶粒长大为粗大的等轴晶。

2.2 浇注工艺对合金微观组织的影响

不同工艺下，合金显微组织形貌如图4至图7所示。从图中可以看到不同工艺下试棒的显微组织呈现典型的枝晶形貌，其中深色区域为枝晶干，由最先形成的棒状主干以及在随后凝固过程中从主干边上生长出的二次枝晶臂组成，浅色区域为最后凝固的枝晶间区域，碳化物以及共晶组织分布在枝晶间区域以及晶界上。当造型方式为填砂时，随着浇注温度的增加，试棒的一次枝晶臂和二次枝晶臂间距增大，而合金中的共晶含量略有增加。当造型方式为单壳时，由于凝固梯度较大，试棒的一次枝晶臂和二次枝晶臂间距减小，合金中的共晶含量显著增加。

金属学凝固理论表明，枝晶臂间距取决于凝固界面的散热条件，而散热能力又取决于凝固初期的冷却条件。冷却速率越大，凝固时间越短，散热能力越强，故枝晶臂间距减小。根据Kurz理论，二次枝晶间

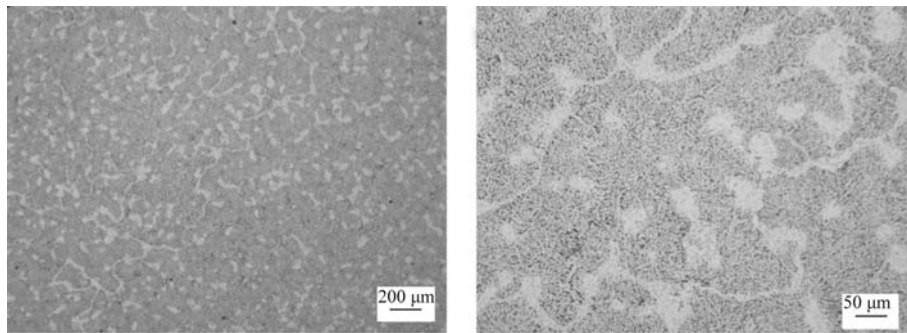


(a) 1 420 °C填砂造型

(b) 局部放大图

图4 填砂造型下1 420 °C时浇注合金组织形貌

Fig. 4 Microstructure morphologies of the alloy poured at 1 420 °C under the condition of sand filling molding

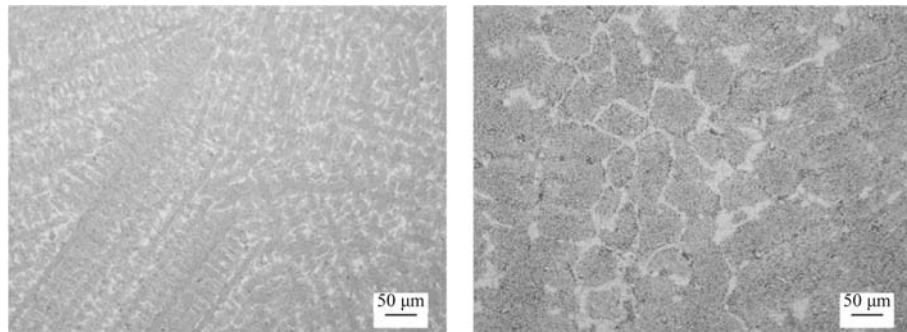


(a) 1 450 °C填砂造型

(b) 局部放大图

图5 填砂造型下1 450 °C浇注时合金组织形貌

Fig. 5 Microstructure morphologies of the alloy poured at 1 450 °C under the condition of sand filling molding

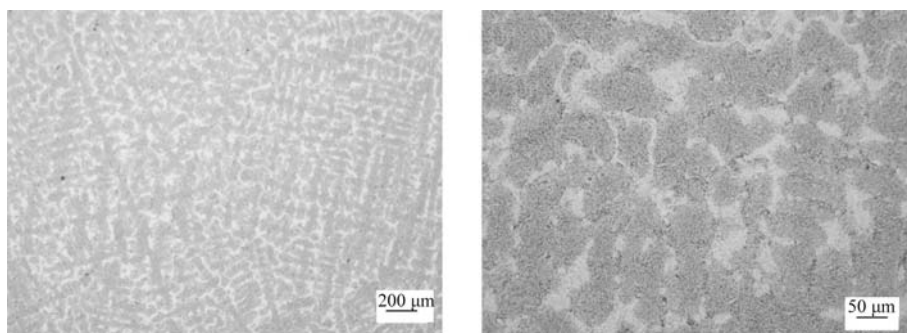


(a) 1 420 °C单壳造型

(b) 局部放大图

图6 单壳造型下1 420 °C浇注时合金组织形貌

Fig. 6 Microstructure morphologies of the alloy poured at 1 420 °C under the condition of single shell molding



(a) 1 450 °C单壳造型

(b) 局部放大图

图7 单壳造型下1 450 °C浇注时合金组织形貌

Fig. 7 Microstructure morphologies of the alloy poured at 1 450 °C under the condition of single shell molding

距SDAS (secondary dendrite arm spacing) d 可以表达成:

$$d = \beta (GR)^n \quad (2)$$

式中: β 是与合金性能有关的参数; n 的值约为-1/3; GR 为冷却速率。

由式(2)可知,随着浇注温度和型壳温度下降,合金冷却速率上升,二次枝晶臂间距减小,试验结果很好地验证了Kurz公式。二次枝晶间距小,组织就比较细密,分布其间的元素的偏析范围就小,此处的疏松等铸造缺陷出现的概率也会减少。而通过二次枝晶臂间距也能很好地掌握合金的冷却状况。

2.3 浇注工艺对合金性能的影响

浇注工艺(浇注温度、造型方式)对Ni₃Al基高温合金1 100 °C的拉伸性能影响如表2所示(每个点为至少5个试样所测值的平均值,以下相同)。当造型方式为填砂时,随着浇注温度的升高,合金的拉伸强度和塑性降低,这是由于浇注温度的升高,导致合金的晶粒粗大,进一步导致合金的拉伸强度降低。当造型方式为单壳时,随着浇注温度升高,合金的拉伸强度随着降低,塑性反而升高。这是由于,浇注温度的升高,导致试棒心部为粗大的晶粒,因此合金的强度降低,而共晶含量的增加,使得合金的塑性升高。

浇注工艺(浇注温度、造型方式)对Ni₃Al基高温

表2 浇注工艺对合金1 100 °C拉伸性能的影响
Table 2 Effects of casting process on tensile properties of the alloy at 1 100 °C

浇注温度/°C	造型方式	抗拉强度/MPa	伸长率/%
1 420	填砂	507.00	16.88
1 450		389.13	16.19
1 420	单壳	431.38	8.13
1 450		414.00	10.25

合金1 100 °C/60 MPa的持久性能影响如表3所示。从表中可以看到,当造型方式为填砂时,随着浇注温度的升高,合金的持久性能显著增加,这是由于浇注温度的升高,导致合金的晶粒粗大,合金的持久性能随着升高。当造型方式为单壳时,由于合金的组织为粗大柱状晶,与造型方式为填砂相比,合金的持久性能略有降低。随着浇注温度升高,促进试棒边部柱状晶形核,晶粒细小,同时造成心部粗大等轴晶的生长。因此,合金的持久性能反而提高。总的来说,造型方式为填砂时浇注试棒的拉伸和持久性能优于单壳浇注试棒的性能。

表3 浇注工艺对合金1 100 °C/60 MPa的持久性能影响
Table 3 Effects of casting process on Stress rupture properties of the alloy at 1 100 °C/60 MPa

浇注温度/°C	造型方式	时间/h
1 420	填砂	53.86
1 450		79.52
1 420	单壳	48.23
1 450		72.01

3 结论

(1) 填砂浇注时,合金的组织为等轴晶。随着浇注温度的升高,合金的晶粒度随着增加;单壳浇注时,合金的组织为柱状晶和柱状晶+等轴晶。随着浇注温度的升高,试棒边部的柱状晶更加细小,而心部转变为粗大等轴晶。

(2) 单壳浇注试棒的一次枝晶和二次枝晶臂间距小于填砂浇注试棒的一次枝晶和二次枝晶臂间距,而单壳浇注试棒共晶含量大于填砂浇注的共晶含量。

(3) 填砂浇注时,随着浇注温度的升高,合金的持久性能显著增加;单壳浇注时,随着浇注温度的升高,合金的持久性能同样显著增加。

参考文献:

- [1] 董虹星, 贺跃辉. Ni₃Al金属间化合物的研究进展 [J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2009, 14 (2): 83-88.
- [2] 范文正, 李明. 推力矢量喷管现状和发展趋势 [J]. 航空科学技术, 2006 (1): 21-22.
- [3] 李艳明, 王全, 刘明坤, 等. JG4246A高温合金尾喷管密封片裂纹机理分析 [J]. 航空发动机, 2021, 47 (6): 96-102.
- [4] 胡峰, 孙文静, 张靖周, 等. 飞行器排气喷管尾焰中离散颗粒分布特性的大涡模拟研究 [C]//第六届空天动力联合会议暨中国航天第三专业信息网第四十二届技术交流会暨2021航空发动机技术发展高层论坛论文集(第四册). 2022: 100-108.
- [5] 钟江伟. 新型 Ni₃Al基JG4246A合金热加工基础研究与铸造工艺优化 [D]. 北京: 清华大学, 2020.
- [6] 薛帅兵. Ni-Al金属间化合物层状结构板反应制备工艺与组织性能 [D]. 太原理工大学, 2021.
- [7] 卢睿智. Re对Ni₃Al金属间化合物结构及力学性能影响研究 [D]. 天津: 中国民航大学, 2020.
- [8] 曹栩, 骆合力, 李尚平, 等. Ni₃Al基合金薄壁件熔模精铸工艺研究 [C]//动力与能源用高温结构材料——第十一届中国高温合金年会论文集. 2007: 592-595.
- [9] 吴晓娟, 冯文刚, 倪伟, 等. 一种复杂薄壁件的熔模铸造工艺研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2015, 35 (3): 292-294.

- [10] 薛鑫, 吴亚夫, 陈兴福, 等. 薄壁调节片熔模铸造缺陷的控制 [J]. 铸造, 2015, 64 (8): 744-746.
- [11] 姚雷, 王倩, 谢秋峰, 等. 高温合金薄壁密封片的精铸工艺 [J]. 铸造, 2016, 65 (4): 333-335.
- [12] ZHONG J, SUN C, WU J, et al. Study on high temperature mechanical behavior and microstructure evolution of Ni₃Al-based superalloy JG4246A [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9 (3): 6745-6758.

Effect of Casting Process on Microstructure and Properties of a Ni₃Al Base Superalloy

WANG Chun-gang¹, SUN Chang-bo¹, XIA Hu-xiang², HE Jin-da¹, JIAO Jun-hong¹, ZHANG Chang-ri¹, XU Qing-yan²

(1. AECC Shenyang Liming Aero-engine Co., Ltd., Shenyang 110143, Liaoning, China; 2. Key Laboratory for Advanced Materials Processing, Ministry of Education, School of Materials Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract:

Ni₃Al base superalloy is often used in the adjusting plate of aeroengine tail nozzle, and its service condition is harsh. The casting process will affect the macrostructure and microstructure of Ni₃Al based superalloy, and further affect the properties of the alloy. The effects of different pouring temperatures and molding methods on the microstructure and properties of the alloy were studied, and the results showing that the grain size and durability of the alloy increase with the increase of pouring temperature. The arm spacing of primary dendrite and secondary dendrite of the casting manufactured by using of sand filling casting process is more than that by using of single shell casting process, and its eutectic content is less than that by using of the single shell casting process. Through further testing, it is found that the tensile properties and durability of the test bars under the condition of sand filling pouring process are better than those under the condition of single shell pouring.

Key words: Ni₃Al; casting process; pouring process
