

K4169合金整体导向环精铸技术及热处理工艺研究

汤鑫 曹腊梅 盖其东 薛明 张勇

(先进高温结构材料国防科技重点实验室,北京 100095)

文 摘 介绍了 K4169合金整体导向环铸件的研制过程与方法。研究获得了整体导向环铸件陶瓷型芯、蜡模和型壳制备、真空熔炼浇注工艺。针对 K4169铸造高温合金偏析严重的特点,研究出了一种新的低成本的热处理制度:1 150 /4 h,AC +1 095 /2 h,AC +955 /1 h,AC +720 /8 h,以 56 /h冷却到 620 /8 h,AC。采用该热处理制度处理的 K4169合金,力学性能优于采用航标规定的热处理制度处理的。重点分析了 K4169合金铸件组织偏析产生的原因,并提出了解决措施。所研制的整体导向环铸件,其冶金质量、化学成分和力学性能满足铸件技术条件的规定。

关键词 导向环,型芯,蜡模,壳型,熔炼浇注,热处理

Investment Casting Technology and Heat Treatment Process of K4169 Superalloy Integral Nozzle Ring

Tang Xin Cao Lamei Gai Qidong Xue Ming Zhang Yong

(National Key Laboratory for Advanced High Temperature Structural Materials, Beijing 100095)

Abstract The investigation process of K4169 alloy integral nozzle ring casting is described. The casting's manufacturing technology have been obtained, including ceramic core, wax pattern, shell mould, metal melting and pouring process, vacuum heat treatment etc. A new kind of low cost heat-treatment condition has been obtained for 1150 /4 h, AC +1095 /2 h, AC +955 /1 h, AC +720 /8 h, at 56 /h cool to 620 /8 h, AC. Comparison with conventional heat-treatment, the mechanics properties of K4169 alloy are greatly improved by means of this new heat-treatment condition. The alloy's microstructure uniformity problems are analyzed in this paper. Furthermore, the measures are provided for this. The casting's metallurgical quality, chemical composition and mechanical properties conform to special technical specification.

Key words Nozzle ring, Ceramic core, Wax pattern, Shell mould, Melting and pouring, Heat treatment

0 引言

整体涡轮导向环(器)是航空航天等大型运载动力装置的关键热端部件之一,结构上一般由数量不等的叶片通过内外环连接构成。在发动机上,导向环的作用是用来调节发动机气流的方向并做功,它对工作的通道尺寸和叶片型面尺寸精度要求很严。由于受高温燃气的直接冲击,导向环承受巨大的热应力,且燃气的氧化腐蚀能力又很强,因此必须选用高温合金材料来制造。随着高温合金精密铸造技术的发展,目前,尺寸较大的复杂导向环铸件一般采用一次性整体

精铸。

某大型火箭发动机整体导向环铸件,材料为 K4169合金。该合金是以体心四方的 γ 相为主要强化相、面心立方的 γ' 相为辅助强化相的沉淀强化型 Ni - Cr - Fe基高温合金。合金在很宽的中低温度范围(-253 ~ 700)内具有较高的强度、塑性、优良的耐腐蚀性以及良好的焊接性能和铸造工艺性能,特别适合于铸造 650 以下工作的宇航用发动机叶轮、导向环、扩压器、机匣以及其他结构件。

本文研究的导向环铸件尺寸较大,外廓尺寸

收稿日期:2007-09-30

作者简介:汤鑫,1965年出生,研究员,主要从事高温合金材料及精密铸造工艺的研究

307 mm 高度 61 mm,内外环连接 79个叶片。叶片进排气边的厚度仅为 0.4 mm,叶片型面精度 ± 0.1 mm。由于叶片数量太多,叶片之间的距离只有 3 mm,同时进排气边太薄,因此铸造难度大,需要研究该导向环专用的高温合金精铸工艺技术。

1 实验过程与方法

由于整体导向环叶片之间的空腔无法采用金属模开型,因此研究初期,采用尿素水溶型芯来制备导向环蜡模,即采用尿素水溶型芯来形成叶片之间的空腔。蜡模压制后,将其置于水中,溶解尿素型芯得到整体导向环蜡模。

研究过程中发现,由于叶片进排气边太薄,蜡模的进排气边很难成型。此外,尿素型芯的致密性一般不好,导致叶片表面产生蜡瘤,且叶片之间空腔太小,工具无法进入修理叶片;涂料制壳时进一步发现,耐火材料不容易撒进叶片之间的窄小空间,导致型壳强度达不到浇注工艺要求。浇注金属时,叶片之间跑火漏钢。说明采用尿素水溶型芯制备蜡模的方案是不可行的。

随后研究采用陶瓷型芯的工艺方法来形成叶片之间的空腔,即叶片与叶片之间采用陶瓷型芯,铸件浇注后进行腐蚀脱芯,就得到整体导向环铸件。在研究使用陶瓷型芯方案时,开始选用比较容易脱芯的氧化硅陶瓷型芯。但铸件真空浇注后发现铸件的叶片表面产生金属瘤,严重影响叶片的表面质量。分析表明是 K4169合金与氧化硅陶瓷型芯界面发生化学反应造成的。表明不能采用氧化硅陶瓷型芯来研制 K4169导向环铸件。最后确定采用氧化铝陶瓷型芯。

铸件采用 K4169母合金重熔浇注。熔炼浇注采用 50 kg真空感应细晶炉,设备带型壳加热装置。在细晶炉内选择合适的型壳温度和浇注温度,保证导向环铸件浇注成型,并使铸件冶金质量符合铸件技术条件的规定。

铸件的热处理采用 ZC - 50双室真空炉。项目研究出了一种性能较标准热处理制度更加优良的热处理制度。

2 结果与分析

2.1 陶瓷型芯、蜡模和壳型制备

氧化铝基陶瓷型芯的材料为电熔刚玉粉 +矿化剂 +增塑剂。增塑剂为石蜡 +聚乙烯。按照专用氧化铝基陶瓷型芯制造工艺配置陶瓷型芯材料,制备陶瓷浆料锭。在 MPI- 56 - 38专用型芯注射机上压制陶瓷型芯,并对经过修理后的湿态型芯按照专用型芯焙烧工艺制度进行埋箱焙烧。

焙烧后的型芯经检验合格后,对表面进行抛光处理(图 1)。

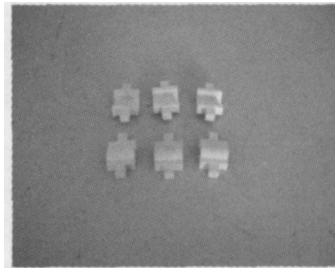


图 1 导向环用氧化铝陶瓷型芯

Fig 1 Alumina ceramic core

制备蜡模时,预先在模具内规定的位置顺序安装 79个氧化铝陶瓷型芯,合模后在 MPI5型压蜡机上压制蜡模(图 2)。

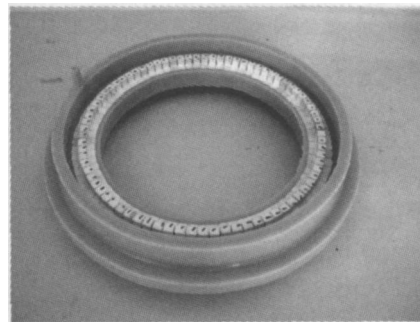


图 2 蜡模

Fig 2 Wax pattern

随后将蜡模与设计制备好的浇注系统进行组合,按照专用的高强度和高透气性等轴晶涂挂工艺制备陶瓷型壳。所制备的壳型透气性和强度均较好,满足导向环熔炼浇注工艺对壳型强度和透气性的要求。

2.2 熔炼浇注

熔炼设备为细晶铸造真空炉,采用符合铸件技术条件的规定 K4169母合金进行重熔浇注。型壳在熔炼炉的加热器内直接加热。加热器到温后,保温足够的时间,以保证型壳从里到外热透。当熔炼炉真空度达到要求时,开始送电熔炼合金。合金精炼温度控制在 1540 以下,利用真空将合金氧化膜去除干净。对于导向环铸件,由于叶片的进排气边很薄,为了保证成型,需要采用较高的型壳温度和浇注温度。经过一系列的浇注实验后,最后得到了合适的铸造参数和铸件凝固方式,即型壳温度为 1080 ~ 1120、浇注过热度控制在 220 ~ 260 时,浇注后升起加热器,使铸件顺序凝固。采用这种方式所浇注的导向环铸件,其冶金质量较好(图 3)。

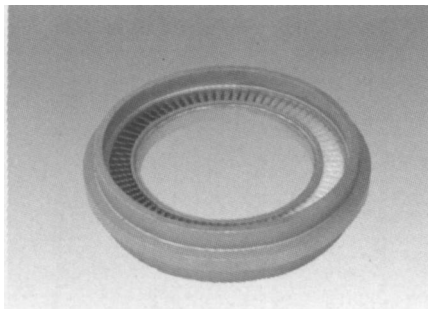


图 3 导向环铸件

Fig 3 oured casting

2.3 铸件真空热处理

铸造 K4169 合金具有较严重的组织偏析倾向, 导向环铸件的铸态组织见图 4(a)。为减轻或消除铸件的组织偏析, 提高铸件的力学性能, K4169 合金整体导向环铸件要进行真空热处理。但是研究发现, 采用航标规定的标准热处理制度不足以消除铸件的铸态组织偏析, 尤其对于高温浇注的铸件。组织偏析严重影响铸件的力学性能。国外采取的方法是对铸件进行 1 120 /4 h 的热等静压处理 (HIP), 除了能显著消除铸造组织的偏析外, 还能闭合铸件内部的疏松, 可大幅度改善铸件的力学性能。

考虑到 HIP 的成本较贵, 且国内中大型的热等静压设备资源非常不足, 对于那些疏松缺陷较轻微的铸件, 单纯应用 HIP 来消除组织偏析, 则经济上显得浪费。因此我们研究了模拟 HIP 的高温处理, 在标准的 1 095 均匀化处理之前, 增加一项高温下均匀化处理来消除铸态组织偏析, 并和标准制度热处理的试样进行力学性能比较。

具体的热等静压和热处理制度如下:

1[#]为 1120 /4 h (HIP) + 1 095 /2 h, AC + 955 /1 h, AC + 720 /8 h, 以 56 /h 冷却到 620 /8 h, AC;

2[#] (航标规定的标准热处理制度) 为 1 095 /2 h, AC + 955 /1 h, AC + 720 /8 h, 以 56 /h 冷却到 620 /8 h, AC;

3[#] 为模拟热等静压温度, 进行高温均匀化, 1150 /4 h, AC + 1095 /2 h, AC + 955 /1 h, AC + 720 /8 h, 以 56 /h 冷却到 620 /8 h, AC。

研究得到了经上述三种热处理制度所处理的试样的室温拉伸性能、600 的拉伸性能和 650 的持久寿命见表 1。

表 1 三种热处理制度的力学性能

Tab 1 Mechanical property of three heat-treatment condition

热处理制度	室温				600				持久性能 (650 /620 MPa)		
	σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ_5 /%	δ_{10} /%	σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ_5 /%	δ_{10} /%	持久寿命 /h	δ_5 /%	δ_{10} /%
1 [#]	964	1098	18.1	28.4	785	877	13.6	32.8	231	3.0	9.4
2 [#]	933	1044	5.5	19.6	757	861	4.2	18.2	122	4.2	8.5
3 [#]	962	1096	16.7	31.3	777	872	11.0	33.7	157	3.7	8.3

从表 1 可以看出, 1[#]制度和 3[#]制度处理的试样, 拉伸塑性明显优于 2[#]。1[#]的持久寿命最高, 3[#]次之, 2[#]的持久寿命最低, 只有 1[#]的 52.8%。

综上所述, 对于 K4169 合金, 比较理想的制度是 1[#], 即在 1 095 均匀化之前对铸件施加 HIP 处理, 不仅可以闭合铸件内部的疏松, 提高铸件致密度, 而且可以有效地消除 K4169 合金铸态组织偏析。如果受铸件成本和热等静压设备的限制, 可以考虑选用模拟热等静压的 3[#]热处理制度。2[#]标准热处理制度处理的试样, 性能最低, 尤其表现为拉伸塑性和持久寿命最低。

2.4 冶金质量评估

将导向环按照铸件技术条件的规定进行目检、荧光、X 光检查。X 光检验时, 发现铸态条件下, 叶片有严重的黑色阴影。切割后观察断面, 发现组织致密, 未见缩孔、疏松和夹杂缺陷。参考国内外资料, 认为

黑色阴影应该是铸件的组织偏析。原因是导向环铸件浇注时采用了较高的型壳温度和浇注温度, 铸件叶片部位的壁厚相差悬殊, 进排气边很薄, 而叶片中间部位很厚, 厚薄部位的凝固速率不同, 厚部位凝固速率缓慢, 产生严重的组织偏析。在目前熟知的高温合金中, K4169 合金的相组织最多, 是典型的复相结构。不同的相对 X 光的反应不同, 这就导致在 X 光底片上产生黑色阴影。均匀化和固溶处理后, 黑色阴影减轻了许多。因此可以认为, 黑色阴影不是铸造缺陷, 而是铸件的组织偏析。

3 问题分析及讨论

铸造高温合金在凝固过程中都有一个类似的性质, 就是 固溶体对比基体 (Ni) 原子半径大的 Ti、Al、Mo、Nb 等元素具有排斥作用。凝固过程越长, 偏析程度越明显。截面较大的部位比截面小的部位冷却速度慢, 偏析也更加严重。被排斥的元素位于枝晶

间区域,主要以碳化物、硼化物、Laves相的形式存在。因此为了使沉淀相在成分上均匀,枝晶间区域的相必须进行固溶处理。

与其他铸造高温合金一样,铸造 K4169 合金也排斥尺寸较大的 Ti, Al, Mo, Nb 等元素,且铸造 K4169 合金属于复相结构,拥有数量最多的相,包括固溶体、 (Ni_3Al) 面心立方)、 (Ni_3Nb) 体心正方)、Laves (Fe_2Nb) 、 (Ni_3Nb) 斜方)和 MC 碳化物等相。K4169 合金铸态组织中的偏析较一般高温合金更加严重,其枝晶轴的 Nb 含量较低,一般约为 2% (质量分数), Nb 在凝固期间被排斥到枝晶间区,因此枝晶间区域的 Nb 含量较高,一般约 10% (质量分数)。枝晶间的相主要为 Laves 和 MC (NbC) ,在铸造冷却过程中富 Nb 的相和相也在这部分沉淀。铸件中截面较厚的部位冷却速率较慢,生成的 Laves 相和相较多,因此加重了偏析程度,对力学性能产生不利的影响。

导向环铸件的铸态组织见图 4(a),从图可以看出,铸件组织偏析严重。图中的黑色区域(或岛状物)是 Laves 相;白色分散颗粒为 MC 碳化物相;盘状相(图中表现为针状相)为相 (Ni_3Nb) 。

对于 K4169 合金,最佳的强化效果是 Nb 均匀地分布,以促使铸件产生最大量和最均匀的 / 沉淀。研究表明^[1-3],即使 Laves 相完全溶解,并非代表 Nb 元素均匀分布,即使进行最大程度的均匀化处理,也不能完全消除 Nb 在枝晶轴和枝晶间偏析。1 095 / 2 h 的标准均匀化处理溶解了大多数的相和部分 Laves 相。Laves 相的完全溶解要经 1 150 至少 3 h,但如果要使 Nb 的分布更均匀,则需要更长的时间。

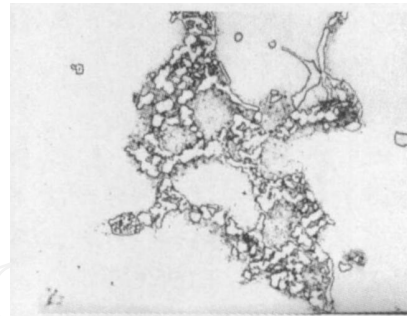
对于导向环铸件,由于壁厚相差悬殊,叶片的进排气边很薄,为保证铸件的成型,铸造时采用较高的型壳温度和浇注温度,铸件产生较严重的组织偏析,该偏析影响铸件的力学性能,因此必须进行随后的处理,尽可能消除偏析。但标准的均匀化(1 095 / 2 h)和固溶处理(955 / 1 h)不足以消除偏析,只有热等静压处理或类似的高温热处理才是消除组织偏析的最有效的手段。

从图 4(b)中可以看出,有害的 Laves 相和相全部消除,因此经 1[#]制度处理的铸件力学性能得到了最大幅度的提高。

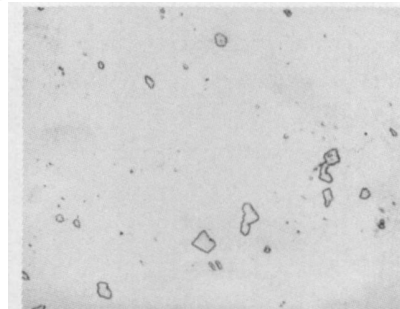
由图 4(c)中可以看出,与铸态组织相比,只有部分 Laves 消失,其体积分数有所降低,在 Laves 相周围产生盘状相,部分固溶到基体中,因此铸件经标准热处理制度处理后的力学性能不是最好的。

图 4(d)表明,在标准热处理之前,增加高温均匀化处理(模拟热等静压处理),其 Laves 相和与其伴生

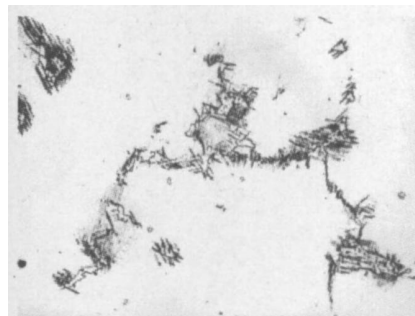
的盘状相 (Ni_3Nb) 相基本消除。因此经 3[#]热处理制度处理的铸件,其力学性能也很好。对于组织致密的铸件(没有疏松)可以采用高温均匀化处理代替热等静压处理,在提高铸件的力学性能同时,并降低铸件的研制成本。



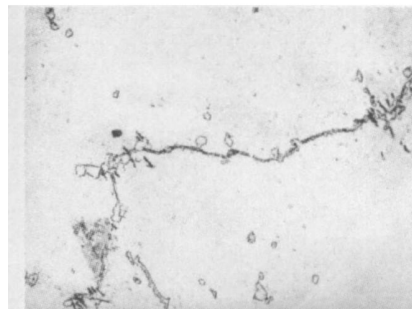
(a) 原始态



(b) 1[#]制度



(c) 2[#]制度



(d) 3[#]制度

图 4 不同状态的 K4169 合金组织 500 ×

Fig 4 K4169 alloy microstructure at different heat-treatment condition

此外,有资料数据显示^[4],合金中碳含量越低, Nb 的偏析越严重,合金的拉伸强度越高,塑性和持久寿命较低;反之,合金中碳含量越高, Nb 偏析越小,合金的拉伸强度越低,塑性和持久寿命越高。

出于铸件采购成本因素方面的考虑,采购方在技术条件中没有对铸件的热等静压或类似的高温热处理作出要求,也未对合金成分中碳含量作出特别的规定,铸件标准热处理制度的力学性能虽然也能勉强满足铸件技术条件的规定,但数据富余量很小。因此,建议对 K4169合金铸件进行 1 120 的热等静压或 1 150 的高温热处理,并将合金成分中的碳含量控制在成分范围的上限。

4 结论

研究获得了导向环铸件的型芯、蜡模和型壳制造、熔炼浇注工艺,并研究了一种新的低成本的热处理制度:1 150 /4 h,AC +1 095 /2 h,AC +955 /1 h,AC +720 /8 h,以 56 /h冷却到 620 /8 h,AC。所研制铸件的冶金质量、化学成分和力学性能满足铸件技术条件的规定,通过了试车考核要求。重点分析了 K4169合金铸件组织偏析产生的原因,并

提出了解决措施。

参考文献

- 1 Pratty Siereveld, Radavich J F. Effect of HIP parameters on fine grain cast alloy 718. Superalloys, The Metallurgical Society, 1988
- 2 Carlson R G, Radavich J F. Microstructural characterization of cast 718, Metallurgy and Applications, The Minerals, Metals & Materials Society, 1989
- 3 Jones A H. An overview of alloy 718 in large structural casting, superalloy 718. Metallurgy and Applications, The Minerals, Metals & Materials Society, 1989
- 4 赵京晨,孙家华.碳含量对 Inconel 718合金组织和性能的影响.铸造高温合金论文集,北京:中国科学技术出版社,1993

(编辑 任涛)