

熔炼方法对高温合金精密铸件荧光显示缺陷的影响

税国彦¹, 张乃干², 史 昆¹, 郭新力¹, 孙 逊¹, 苏贵桥¹, 金 磊¹

(1. 沈阳铸造研究所有限公司, 高端装备轻合金铸造技术国家重点实验室, 辽宁沈阳 110022;

2. 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司, 辽宁沈阳 110043)

摘要: 高温合金精密铸件荧光显示缺陷修复耗时长, 是影响铸件的质量和工期主要原因之一。采用冷坩埚真空悬浮熔炼设备和真空感应熔铸设备成形了K536高温合金精密铸件。对铸件进行化学成分、X射线及荧光渗透检验, 结果表明: 采用冷坩埚真空悬浮熔炼工艺的铸件没有荧光显示缺陷, 采用真空感应熔炼熔铸的铸件存在密集荧光显示缺陷。证明了采用冷坩埚真空悬浮熔炼工艺能够减少高温合金精密铸件荧光显示缺陷, 降低铸件后处理工作量。

关键词: 荧光渗透检测; K536高温合金; 熔模铸造; 冷坩埚真空悬浮熔炼; 真空感应熔炼

在高温合金精密铸件生产过程中, 荧光显示缺陷控制是保证产品合格率和交付周期的关键, 荧光显示缺陷失控, 将成倍增加生产过程的人力和物力消耗。导致高温合金精密铸件荧光显示缺陷的主要原因有铸件表面缩松和表面夹杂。铸件表面缩松与铸件的工艺设计和浇注工艺参数的选择相关; 铸件表面夹杂则主要受母合金质量、型壳制作工序和重熔浇注工序外来夹杂物的影响^[1]。

高温合金熔模铸造过程中, 普遍采用真空感应熔铸设备成形铸件。产品生产过程中采用母合金锭, 在成形坩埚中重熔后浇注入预热型壳, 得到铸件。在母合金质量及型壳质量合格、操作过程规范条件下, 坩埚质量决定了产品的荧光显示缺陷程度。国内高温合金真空感应熔铸用成形坩埚质量存在波动。对于荧光渗透检验要求严格的铸件, 如航空发动机涡轮叶片类铸件, 大都采用进口坩埚, 甚至进口一次性坩埚, 以保证产品质量的稳定, 但是进口坩埚价格高, 订货周期长, 在当前国际形势下容易被国外限制。此外, 重复使用的成形坩埚在使用过程中需用砂、粉捣实固定于工装中, 使用后需将捣实的砂、粉清理出来, 放入新的坩埚重新捣实。该过程耗时长, 劳动强度大, 劳动条件恶劣, 固体废弃物排放多。

冷坩埚真空悬浮熔炼, 主要应用于金属间化合物、高纯溅射靶材、难熔金属和合金、氧化物陶瓷和宝石、放射性材料、多晶硅等材料的熔炼^[2]。20世纪80年代有人提出采用冷坩埚真空悬浮熔炼技术熔铸钛合金铸件。2011年, 英国伯明翰大学采用冷坩埚悬浮熔炼工艺和精密铸造型壳, 熔铸了钛铝合金叶片, 如图1所示^[3]。

在国内, 研究冷坩埚真空悬浮熔炼的单位有沈阳铸造研究所有限公司、兰州理工大学、北京科技大学、西北工业大学、哈尔滨工业大学、北京钢铁研究总院、深圳市赛迈特悬浮冶金科技有限公司等单位^[4-7]。其中兰州理工大学采用冷坩埚悬浮熔炼和真空吸铸工艺研究了K418、K4169等高温合金的组织 and 性能^[4-5]。2018年西北工业大学采用冷坩埚悬浮熔炼和真空吸铸工艺铸造了钛铝合金铸件, 其工艺原理和铸件如图2所示^[7]。

综上, 采用冷坩埚悬浮熔炼工艺熔铸铸件已经能够实现, 然而人们对该种工艺的使用仍然限制在难熔金属及活泼金属的熔炼, 还未充分开发该工艺的其他优点, 如: 不使用耐火材料坩埚, 可以避免坩埚对铸件质量的影响, 提高铸件荧光渗透检

作者简介:

税国彦(1986-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为高温合金精密铸造。E-mail: djtushgy@163.com

中图分类号: TG132.3⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2022)

06-0719-05

收稿日期:

2021-09-30 收到初稿,

2021-12-17 收到修订稿。

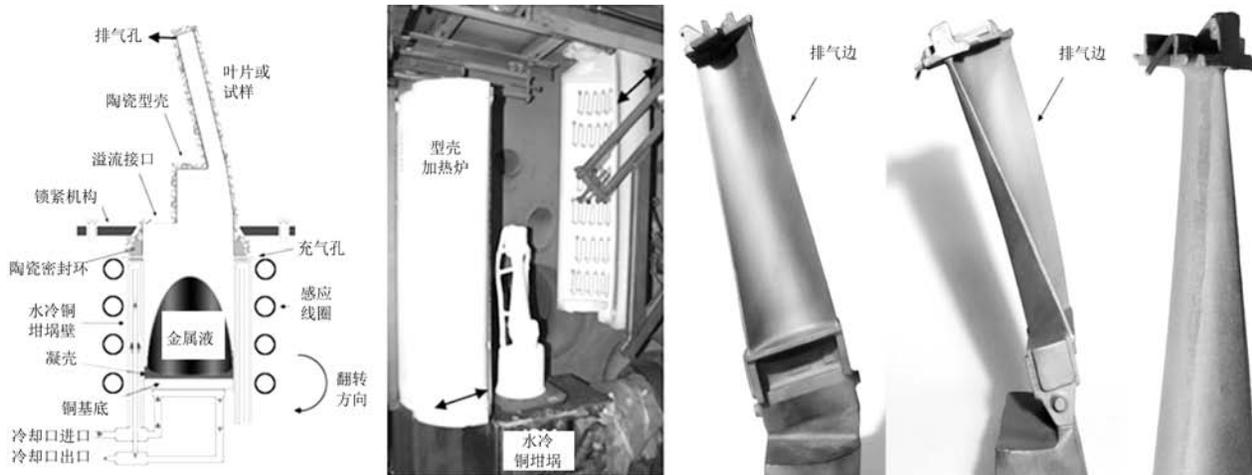


图1 伯明翰大学采用冷坩埚悬浮熔炼方法熔铸TiAl合金的原理及铸件

Fig. 1 Melting and foundry principle and castings of the TiAl alloy manufactured by the cold crucible vacuum levitation melting at Birmingham University

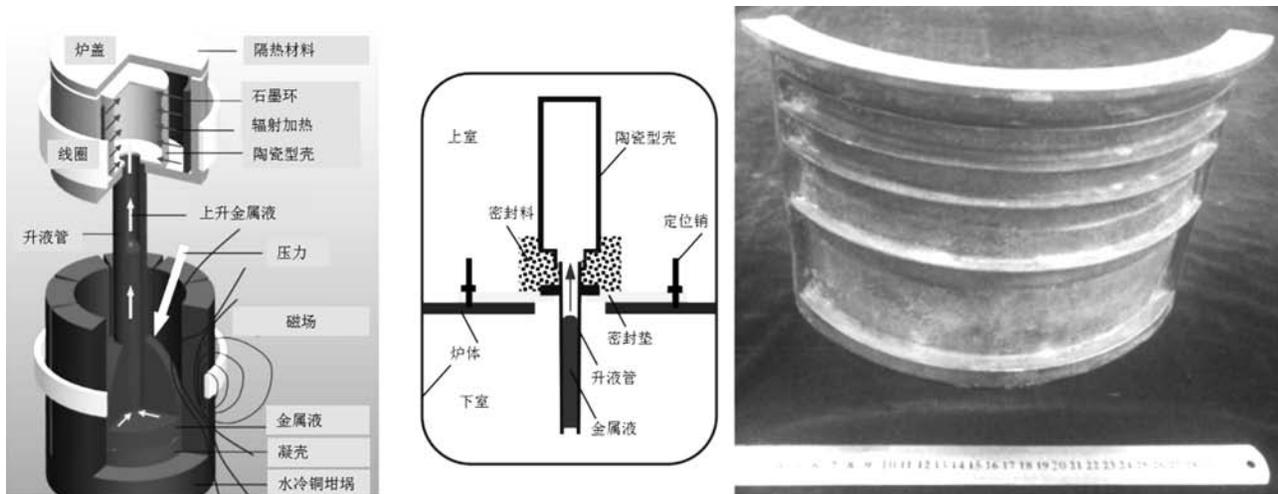


图2 西北工业大学冷坩埚悬浮熔炼真空吸铸原理及成形的铸件

Fig. 2 The principle of the vacuum suction casting and cold crucible levitation melting and the formed casting in Northwest University of Technology

验合格率；熔炼不同材质铸件不用更换坩埚，可以提高铸件产品熔铸效率；工艺过程无固体废弃物排放；熔炼过程劳动强度低、熔炼效率高、容易实现智能化等。

沈阳铸造研究所有限公司现有真空悬浮熔炼设备能够一次性熔炼浇注25 kg高温合金，满足大部分高温合金精密铸件产品的熔炼要求。本研究利用冷坩埚真空悬浮熔炼炉和真空感应熔炼炉，选用同批次母合金和型壳，熔铸了相同的高温合金精密铸件，着重对比了两种工艺浇注铸件的荧光渗透检验结果。

1 试验材料与方法

试验合金材料采用直径为80 mm、K536高温合金锭30 kg。材料成分如表1所示。

铸件三维实体模型如图3所示，轮廓尺寸230 mm × 150 mm × 25 mm，最小壁厚2 mm，最大壁厚10 mm，重量2.5 kg。采用硅溶胶制壳工艺制备精铸型壳，型壳面层采用刚玉粉及刚玉砂，过渡层及背层采用铝矾土粉和煤矸石砂，型壳厚度约7 mm；型壳（如图4）经清洗、检验、烘干后，外包保温棉，预热至800 ℃，保温

表1 K536合金重熔前后化学成分

Table 1 Chemical compositions of the K536 alloy before and after remelting

 $w_B/\%$

项目	C	Cr	Co	Mo	W	Fe	Mn	Si	S	P	Ni
母合金成分	0.08	22.1	1.5	9.0	0.8	19.3	0.04	0.05	0.005	0.005	余量
冷坩埚真空悬浮熔炼后	0.06	22.3	1.4	8.9	0.7	19.2	0.01	0.01	0.002	0.001	余量
真空感应熔炼后	0.07	22.2	1.4	9.0	0.7	19.1	0.01	0.01	0.002	0.001	余量

2 h后等待浇注。

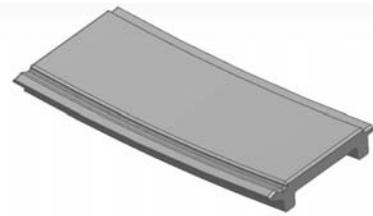


图3 铸件三维实体模型
Fig. 3 3D solid model of the casting



图4 铸件型壳
Fig. 4 The mold shell of the casting

采用三室真空感应熔铸设备成形时，选用铝质等静压成形坩埚，母合金重15 kg，浇注真空度1.0 Pa，浇注温度1 430 ℃，浇注时间5 s，型壳从出炉至浇注时间间隔约3 min，浇注完成3 min后破真空，铸件在大气条件下冷却。

采用冷坩埚悬浮熔炼设备时，选用同批次母合金，重量15 kg，型壳入炉后，设备抽真空至0.1 Pa后，充氩气至500 Pa，开始重熔，最大重熔功率220 kW，合金全部熔化后，保持3 min后开始浇注，浇注时，型壳已入炉约25 min，浇注时间3 s。浇注完成3 min后破真空，铸件在大气条件下冷却。

铸件脱壳、吹砂后，进行化学成分检测（表1）、

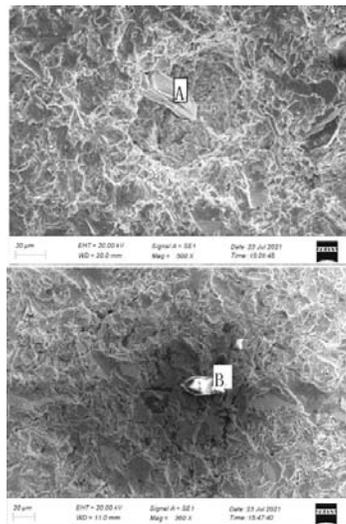
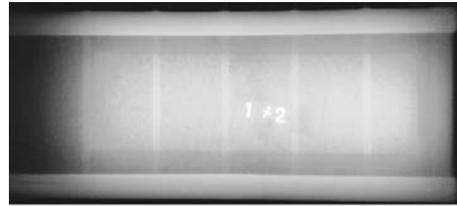


图7 荧光显示缺陷显微形貌和成分

Fig. 7 Morphology and chemical composition of the indication defects of the fluorescence penetrate testing

X射线检测（图5）、荧光渗透检验（图6）。标记铸件中荧光显示严重的部位，切割取样，选择两处典型区域，采用ZEISS EVO MA25型扫描电镜分析铸件表面荧光显示缺陷的形貌及微区成分，如图7所示。

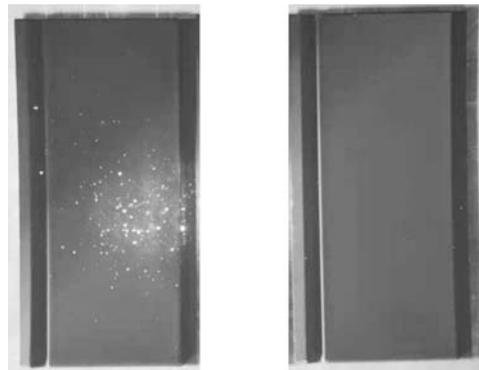


(a) 真空感应熔炼工艺成形



(b) 冷坩埚真空悬浮熔炼工艺成形

图5 铸件X射线检验结果
Fig. 5 X-ray inspection results of the castings



(a) 真空感应熔炼工艺 (b) 冷坩埚真空悬浮熔炼工艺

图6 铸件荧光渗透检测结果

Fig. 6 Fluorescence penetrant testing results of the castings

元素	线类型	质量分数/%	原子分数/%
C	K 线系	5.89	9.33
O	K 线系	50.61	60.18
Al	K 线系	43.02	30.33
Ni	K 线系	0.48	0.15
总量		100.00	100.00

元素	线类型	质量分数/%	原子分数/%
O	K 线系	51.58	64.24
Al	K 线系	48.42	35.76
总量:		100.00	100.00

2 结果与分析

化学成分检验结果表明,两种工艺熔铸的铸件化学成分和母合金相比没有明显变化,均满足铸件化学成分要求。X射线检验结果显示,两种工艺浇注的铸件没有超出铸件技术条件的缩松、夹杂、气孔等缺陷。荧光渗透检验结果显示:采用冷坩埚悬浮熔炼工艺成形的铸件几乎没有荧光显示,满足铸件技术条件要求;而采用感应熔炼工艺成形的铸件表面存在密集显示,超出铸件技术条件要求。图7中显示了这些显示所在的微观形貌:夹杂物直径约0.02 mm,在夹杂物周围约直径0.1 mm的范围内,铸件组织不致密。通过能谱分析了这些荧光显示点的微区成分,均为 Al_2O_3 夹杂物。

因两种熔炼工艺选用的母合金及型壳均为相同批次,型壳预热过程相同,冷坩埚悬浮熔炼工艺成形的铸件没有荧光显示,真空感应熔炼工艺熔铸的铸件有严重荧光显示,因此,导致真空感应熔炼工艺熔铸的铸件荧光显示严重的是浇注过程。荧光显示缺陷能谱分析结果为 Al_2O_3 夹杂物,由此可以推断,导致铸件荧光显示缺陷的夹杂物来源主要是坩埚。检查浇注后的坩埚发现,坩埚金属液出口处有面层脱落现象(图8)。

分析后认为,图6中,采用真空感应熔炼工艺熔铸的铸件出现的严重荧光显示的原因是,浇注时,坩埚



图8 使用后的真空感应熔炼坩埚

Fig. 8 Crucible after vacuum induction melting

口表面脱落的微小颗粒随金属液进入型腔内部,分布于铸件表面。由于非金属导热率远低于金属,铸件凝固时,与夹杂物相邻的金属最后凝固,在这些夹杂物周围出现显微缩松,吸附荧光液多,导致了铸件表面荧光显示严重;冷坩埚真空悬浮熔炼过程中,由于坩埚内没有非金属颗粒物,所以铸件表面没有夹杂物,铸件表面致密,不能吸附荧光液,因此,铸件表面无荧光显示。

图8展示了浇注5炉后坩埚金属液出口情况,可以看到,坩埚金属液出口有明显的脱落现象,这些脱落的氧化铝颗粒随金属液一起进入到铸件中,导致荧光夹杂和表面缩松缺陷。这种现象随坩埚使用次数的增加,从无到有,从轻微到严重。因此,采用真空感应熔炼工艺熔铸熔模铸件时,必须限制坩埚使用次数。对于荧光显示缺陷要求严格的铸件,大多采用一次性坩埚,以防止坩埚面层脱落影响铸件质量。

冷坩埚悬浮熔炼过程中,坩埚由水冷铜瓣及之间的绝缘材料组成,金属液几乎不与耐火材料接触,防止了耐火材料对金属液的污染。同时,冷坩埚真空悬浮熔炼工艺具有净化合金液中非金属夹杂物的能力^[8]。因此,采用冷坩埚真空悬浮熔炼工艺熔铸的铸件中几乎没有非金属夹杂缺陷。

冷坩埚真空悬浮熔炼不污染熔炼合金,采用该工艺浇注铸件能够避免非金属坩埚对铸件质量的影响。由于目前没有精确测量冷坩埚真空悬浮熔炼金属液温度的方法,要求铸造工艺设计时,浇注温度工艺窗口大。此外,由于冷坩埚悬浮熔炼工艺金属液过热度有限,能否浇注大尺寸薄壁铸件还需要进一步研究。

通过试验也证明了,采用冷坩埚悬浮熔炼工艺成形的高温合金精密铸件能够大幅度降低后处理过程中荧光显示缺陷修复打磨工作量,降低产品生产时间、人力和物力消耗,值得进一步研究。若能攻克该技术的短板,可以弥补我国优质真空感应熔炼用坩埚严重依赖进口的不足,同时为生产制造高质量、高可靠性的高温合金精密铸件提供全新的工艺方法。

3 结论

(1) 采用冷坩埚真空悬浮熔炼工艺能够成形荧光显示缺陷少的高温合金精密铸件。

(2) 采用真空感应熔炼工艺成形的铸件出现严重的荧光显示,主要为 Al_2O_3 夹杂物,其来源于坩埚。

参考文献:

- [1] 廖华清. 无余量熔模精密铸造 [M]. 国防工业出版社, 1984.
- [2] 韩至成. 电磁冶金学 [M]. 冶金工业出版社, 2001.
- [3] HARDING R A, WICKINS M, WANG H, et al. Development of a turbulence-free casting technique for titanium aluminides [J]. *Intermetallics*, 2010, 19 (6): 805-813.
- [4] 蒲永亮, 寇生中, 董天文, 等. 水冷铜坩埚重熔吸铸高温合金K418的成分、组织和力学性能 [J]. *金属功能材料*, 2018, 25 (4): 22-26.
- [5] 曲红霞, 寇生中, 蒲永亮, 等. 冷却速率对GH4169合金铸态组织和力学性能的影响 [J]. *铸造技术*, 2016 (3): 481-484.
- [6] 李磊, 张森, 元少勇, 等. 熔炼难熔金属的新技术——真空悬浮熔炼技术 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2016, 36 (4): 435-437.
- [7] YANG J, WANG H, WU Y, et al. A combined electromagnetic levitation melting, counter-gravity casting, and mold preheating furnace for producing TiAl alloy [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2017: 1700526.
- [8] GAO X, ZHANG L, LUAN Y, et al. Investigation of inclusion agglomeration and flotation during levitation melting of Ni-based superalloy in a cold crucible [J]. *JOM* 2020, 72: 3247-3255.

Effects of Melting Methods on Fluorescence Penetrate Testing Indication of Superalloy Investment Castings

SHUI Guo-yan¹, ZHANG Nai-qian², SHI Kun¹, GUO Xing-li¹, SUN Xun¹, SU Gui-qiao¹, JIN Lei¹

(1. Shenyang Research Institute of Foundry Co., Ltd., State Key Laboratory of Light Alloy Foundry Technology for High-End Equipment, Shenyang 110022, Liaoning, China; 2. Shenyang Liming Aereo-Engine Co., Ltd., Shenyang 110043, Liaoning, China)

Abstract:

The repairing of the fluorescence indication defects takes a long time in the production process of superalloy investment castings, which is one of the main factors affecting the quality and schedule of the castings. The K536 superalloy investment castings were made by cold crucible vacuum levitation melting equipment and vacuum induction melting and casting equipment, respectively, and the chemical composition analysis, the X-ray inspection and the fluorescence penetrant testing were carried out on these castings. The results showed that the castings obtained by the cold crucible vacuum levitation melting equipment had almost no fluorescent indication defects, but the castings manufactured by the vacuum induction melting and casting equipment had dense fluorescent display defects. It is proved applying the cold crucible vacuum levitation melting technology can reduce the fluorescent indication defects of the superalloy investment casting and post-treatment workload.

Key words:

fluorescent penetrate testing; K536 superalloy; investment casting; cold crucible vacuum levitation melting; vacuum induction melting