DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.05.010

双金属银合金铸件工艺设计及缺陷研究

曾　乐,曹志勇,张文军
(中国航发 西安航空发动机有限公司,陕西 西安 710021)

摘　要:针对银合金双金属封严圈铸件生产过程中经常出现的夹渣缺陷进行研究,通过重点控制感应加热过程,减少可能出现的夹渣缺陷;采用感应线圈加热水冷成型工艺,制备了组织良好,理化性能达到要求的铸件。结果表明,零件夹渣缺陷最少的最佳工艺参数为感应加热温度:815±5 ℃,感应电压:350±10 V;运用粘性理论分析获得了人工搅拌的最佳位置和最佳方法;在保证感应加热温度前提下,应降低感应频率,使熔剂更容易上浮,达到减少夹渣缺陷的目的。

关键词:双金属铸造;夹渣缺陷;感应加热;粘度理论

中图分类号:TG245　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)05-0468-05

Study on Casting Process Design and Defect of Bimetallic Silver Alloy

ZENG Le, CAO Zhiyong, ZHANG Wenjun
(Aeec Xi'an Aero-engine Ltd., Xi'an 710021, China)

Abstract: The slag inclusion defects often occur in the process of silver alloy bimetal sealing ring casting production was studied. By controlling induction heating process, slag inclusion defect can be reduced. The castings with good microstructure and physical and chemical properties were prepared by induction coil heating and water-cooling process. The results show that the slag inclusion defect parts at least one of the best technological parameters for induction heating temperature is 815±5 ℃, the induced voltage is 350±10 V; The optimum position and method of manual stirring are obtained by using viscosity theory. Under the premise of ensuring the induction heating temperature, the induction frequency should be reduced to make the flux float more easily to achieve the goal of reducing slag inclusion defects.

Key words: bimetal casting; slag defect; induction heating; viscosity theory

双金属铸造是在一定的温度下,依靠原子扩散的作用,在金属基体上粘结一层耐磨合金。金属基体通常包括钢基、铜基等。耐磨合金通常包括银基合金、铜基合金、锡基合金、铅基合金等。这类零件,由金属基体提供零件所需要的强度,由耐磨合金满足零件对耐磨、密封等的特殊要求,在航空产品、大马力的柴油机、燃汽轮机等大型机械中具有广泛用途[1]。本文针对银合金双金属封严圈铸件进行研究,该类零件钢基内直径 200~450 mm,该铸件为航空发动机双金属铸件,生产前期采用炉内熔炼,炉外浇注,反复入炉加热的浇注工艺,机加工后铸件结合不良和夹渣缺陷显现明显,其生产效率较低,因此笔者针对上述问题重新制定了工艺方案,研究并试制了一种炉外熔炼浇注,感应线圈加热的工艺成型方式,在达到相应技术要求的同时,大大提升了生产效率,该方法可有效控制工艺温度,提升了铸件的结合层质量,防止夹渣的产生就成为了工艺设计的重点,本文将该对零件夹渣问题作一研究。

1　试验材料及试验方法

1.1　试验材料

本文选取零件钢基外壳内直径为 350 mm 的零件进行研究(见图 1)。

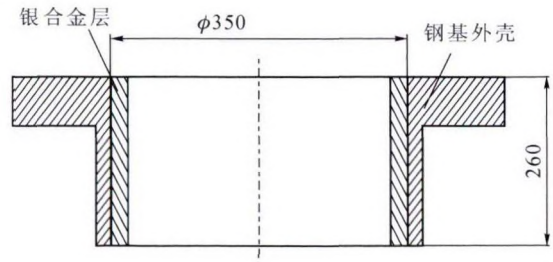


图 1 双金属封严圈铸件
Fig.1 Bimetal seal ring casting drawing

银合金双金属铸件的钢基为不锈钢1Cr18Ni9Ti,重 3.5 kg;浇注管材料为 20 优质碳素钢;浇注合金材料为含银 45%的银合金,银合金层厚度要求 1.5 mm,银合金化学成分见表 1。

辅助材料主要包含以下几种:①分析纯 NaOH;②分析纯 Na_2CO;③浓盐酸;④五号强韧焊剂。

收稿日期:2019-02-16
作者简介:曾　乐(1982-),陕西西安人,工程师,硕士生.从事铸造产品研发和工艺设计工作.

表1 银合金化学成分 w(%)
Tab.1 Chemical composition of silver alloy

元素	Ag	Cu	Zn	Cd	杂质总和
含量	41～43	16～18	15～17	24～26	≤0.02

1.2 试验方法

双金属封严圈铸件基本工艺过程：由机械加工车间提供经一定加工的金属基体。金属基体表面要求有较高的表面光洁度。通过机械加工或者借助工装，形成一个包含所要粘结耐磨合金的金属基体表面在内的型腔；对型腔内表面进行除油、酸洗腐蚀处理，以除去金属基体表面的锈蚀、油污等杂物；对经过酸洗腐蚀处理的金属基体表面涂挂涂料，以保护经过处理的表面在预热及加热过程中不被氧化；熔化耐磨合金，浇注到金属型腔中；采用感应加热水淬设备对零件感应加热，经过多次搅拌后，在电磁搅拌和机械搅拌的双重作用下，熔剂夹渣能够得到彻底地上浮，水淬冷却后去应力退火，检测结合层金相，并在机械加工过程中进行相应的无损检测、结合层剪切强度检测和椭圆度检测。

1.2.1 零件前处理

零件前处理分为除油、组焊、酸洗 3 个步骤。

对待组焊的外壳和浇注管进行超声波除油，将组件或外壳放入 NaOH 溶液的超声波除油设备内进行除油。NaOH 溶液浓度为 9%~11%，NaOH 溶液的温度 40~60 ℃，超声波除油时间不少于 30 min。零件采用交流非熔化极手工氩弧焊机，焊丝采用 1Cr18Ni9Ti 焊丝，将浇注管与外壳组焊，要求焊缝平滑，无焊瘤。双金属封严圈铸件基本结构见图 2 所示。

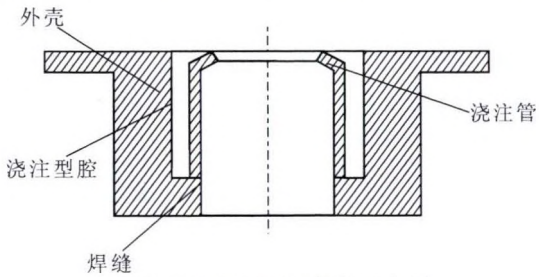


图 2 双金属封严圈铸件组合图
Fig.2 Bimetal seal ring casting combination drawing

双金属铸造中，对外壳和浇注管表面要求较高，不允许有任何油污及氧化层，从晶体结构分析，氧化物的致密度高于金属本身，因此氧化层的存在严重影响双合金的结合强度，因此设计将组合好的零件进行酸洗腐蚀，采用盐酸腐蚀和碳酸钠中和的酸洗工艺。该除油和酸洗工艺符合 GB/T13911-2008 技术要求，酸洗工艺见表 2。

1.2.2 铸件成型工艺

铸造成型过程分为涂挂涂料、合金熔化、感应加热、水淬冷却 4 个步骤。

表2 外壳和浇注管酸洗工艺参数表
Tab.2 Acid pickling process parameters of shell and pouring

名称	浓度	浸入时间
HCl	140~180 g/L	20~30 s
Na_2CO_3	30~50 g/L	3 s
热水	80 ℃	5 s

在型腔内部涂挂强韧焊剂水溶液，目的是保护清洗过的表面不被二次氧化，选定的熔剂配比为：涂料用 400 g 强韧钎焊焊剂与 800 mL 蒸馏水溶液混合后注满零件的型腔，零件放入中频感应线圈中加热，并使水分蒸发。

其中零件感应加热设备为自主设计，材料为矩形紫铜管，根据文献[2]，确定感应线圈壁厚 h=3 mm，轴向宽度 a=8 mm，径向宽度 b=10 mm。根据文献[3]，设计线圈感应电压在 150~500 V 之间，本实验通过 7 个批次的验证得到最佳感应电压。

合金采用中频感应熔化并用强韧钎焊焊剂覆盖。银合金出炉温度为 810~820 ℃。合金出炉后，浇入零件型腔中，通过调整一定的输出电压，并保持一定的时间，来获得所需要的合金温度(见图 3)。采取红外测温，温度控制在 810~820 ℃，合金在感应加热过程中用钨丝对零件型腔的进行多次搅拌。

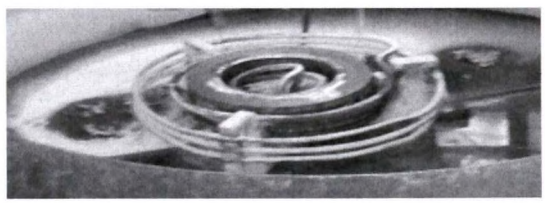


图 3 感应加热示意图
Fig.3 Schematic diagram of induction heating

电磁感应线圈熔化试验数据(见表 3)。

关闭电源，进行冷却。控制冷却水面缓慢上升，使冷却水首先接触零件底部，并保持适当时间后，再缓慢上升，直至淹没整个零件。

本试验共试制 7 批次零件，通过调整感应电压实现试验温度控制。

1.2.3 铸件后处理工序

铸造后处理分为去应力退火、吹砂、铸检 3 个步骤。

去应力热处理处理采用炉温：550±10 ℃，保温时间：2 h。出炉空冷(见图 4)。

吹砂后打磨铸瘤，目视检查结合缝，应无结合不良，浇注不足缺陷 。检测零件椭圆度，要求椭圆度不大于 0.15 mm。机械加工后荧光检测，结合缝要求无结合不良。

表 3 感应加热及感应温度参数表
Tab.3 Induction heating and induction temperature parameters

批次号	1813	1814	1815	1816	1817	1818	1819
感应电压 /V	160±10	180±10	260±10	280±10	300±10	350±10	400±10
感应温度 /℃				810~820			

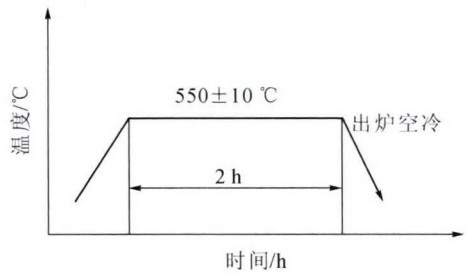


图 4 热处理曲线
Fig.4 Curve of heat treatment process

2 试验结果及分析

2.1 试验结果分析

对试验件进行荧光渗透检验，荧光渗透检验按HB/Z61 进行，100%结合面良好，符合 GB/T26953—2011 要求，部分零件双金属层内表面存在夹渣缺陷。

对试验件进行金相组织检验，100%结果合格，符合 GB/T26953—2011 要求，结合层金相组织，见图 5。

零件剪切强度分析，铸件要求结合面剪切强度大于 70 MPa,试验批次中有 2 批未达到要求，其余批次合格，试验检测方法符合 GB12948-91 标准要求，各批次的剪切强度实验数据(见表 4)和数据分析图(见图 6)。

表4 剪切强度数据统计表
Tab.4 Statistical table of shear strength

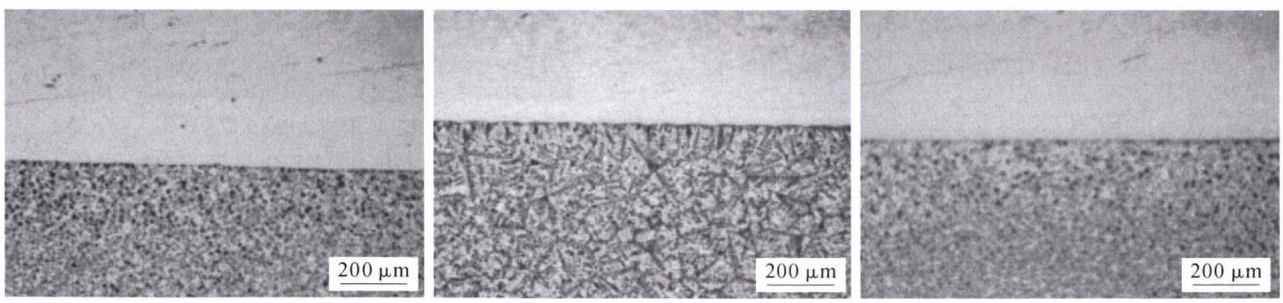
批次号	1813	1814	1815	1816	1817	1818	1819
剪切强度 /MPa	68.12	68.33	76.52	77.22	77.72	80.46	80.51

零件结合层良好，说明零件前处理、合金熔化、感应加热工艺参数设定正确，设备工装设计合理，零件控制措施有效。从试验铸件合格率统计表(见表5)可看出选用 1818 批次的参数最为合理，夹渣报废率最低，所以针对该零件将感应电压确定为 350±10 V。

零件椭圆度检测结果表明零件椭圆度在 0.03~0.17 mm 毫米之间，在可控范围之内，该热处理工艺参数设定合理。

2.2 零件缺陷分析与对策

荧光检测发现，零件主要缺陷为双金属层内表面夹渣缺陷，经理化分析该缺陷放大后为团絮状氧化夹渣(见图 7)，主要夹渣成分为硼和钙的氧化物(见图 8)，该成分与零件感应加热前涂挂的涂料一致，可判断为涂料在感应加热时未上浮，造成的夹渣缺陷。



(a)双金属结合面组织批次1817　(b)双金属结合面组织批次1818　(c)双金属结合面组织批次1819

图 5 铸件结合面金相组织照片
Fig.5 Metallographic microstructure of casting binding surface

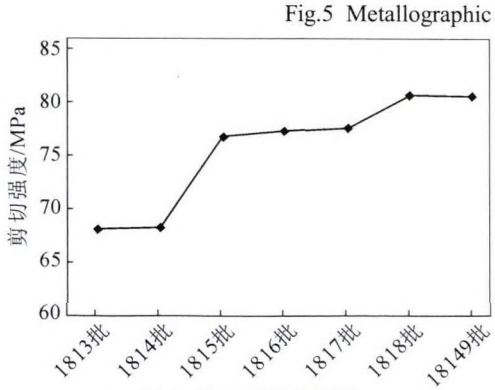


图 6 剪切强度分析图
Fig.6 Analysis diagram of shear strength

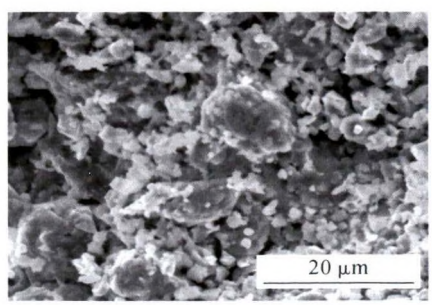


图 7 铸件缺陷金相组织照片
Fig.7 Microstructure of casting slag defects

表5 铸件合格率统计表

Tab.5 Statistical table of casting qualified rate

批次号	1813	1814	1815	1816	1817	1818	1819
夹渣报废率(%)	12	13	10	9	9	5	8

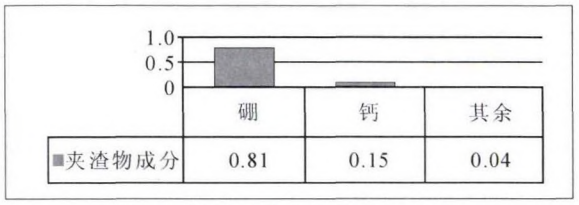


图 8 铸件夹渣缺陷化学成分分析图

Fig.8 Chemical composition analysis diagram of slag defects in casting

该零件生产过程为电磁加热过程，该加热过程为感应电磁线圈加热，并有两次搅拌过程。以下将对机械搅拌和电磁搅拌过程进行分析，从机械搅拌和电磁搅拌两个方面进行分析，力求减少双金属封严圈生产中常见的熔剂夹渣缺陷，提高零件质量。

2.2.1 机械搅拌分析

双金属封严圈铸件在浇铸过程中可定义为流体，用钨丝搅拌，涂料上浮。这一过程在理论上可被认为是在促使流体尽快形成一个大的紊流区，以促进涂料上浮。

由于流体具有粘性，即使在紊流条件下，流体依然粘附于壁面，壁面处的相对速度为零，离开壁面流体速度也不可能突然增加[4]。因此，靠近壁面处的流体质点仍保持比较稳定的状态，即在壁面附近有一层呈流层状态的薄层，称为粘性底层(见图 9)，这也正是壁面涂料层所在区域，这就为通过搅拌以使壁面所附着的涂料得以上浮提供了难度。

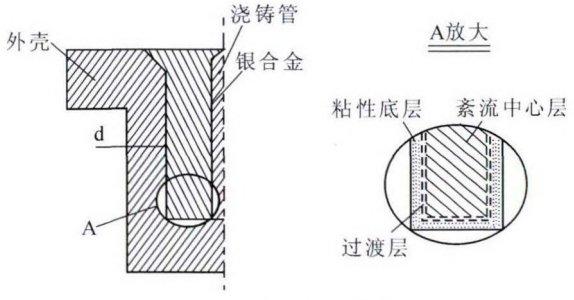


图 9 双金属铸件流体模型

Fig.9 Fluid model of bimetal casting

离壁面越远，壁面对流体的影响就越小，经过一段过渡层，才形成紊流。粘性底层的厚度很薄，而且其速度梯度很大，可近似的认为该层内的速度梯度为常数，因此剪切应力也恒定不变。粘性底层的厚度 δ 与主流的紊动程度有关，紊动程度越剧烈，粘性底层越薄。而紊动程度又与雷诺数有关，所以 δ 与 Re 成反比，用公式表示为[4]：

$$\delta \approx \frac{32.8d}{\mathrm{Re}\sqrt{\lambda}} \tag{1}$$

式中，d 为浇注型腔径向尺寸 (见图 9)，λ 为沿程流阻系数。

通过式(1)可计算出用钨丝搅拌合金时，钨丝与不锈钢外壳的最佳距离，在这一区域内，钨丝搅拌使粘性底层中的熔剂能够得以上浮，在这也是钨丝搅拌使熔剂上浮的最佳距离。

式(1)中重点需要讨论的是其中的 λ 值，即沿程流阻系数。可以通过尼古拉斯曲线来确定 λ 值。尼古拉斯曲线沿程流阻系数层流方程[4]为：

$$\lambda=64/\mathrm{Re} \tag{2}$$

其中，带沉沟槽的同心环缝形流道临界雷诺数 Re 为 700。

公式说明：

双金属铸件的环缝形流道 d 均控制在 5 mm 左右，故取 d=5 mm。

粘性底层临界雷诺数 Re≤700 [4]，零件内径为 ϕ350 mm，此处取临界雷诺数 Re 为 350。

故而具体计算如下：

λ=64/Re=64/350=0.18

$\delta \approx 32.8d/\mathrm{Re}\sqrt{\lambda} \times 32.8\times5/350\times\sqrt{0.18}$ =1.2 mm

通过计算，得粘性底层厚度约为 1.2 mm，这一厚度与钢体外壳内壁上所附着的熔剂层一致，因此应当用直径为 1 mm 的钨丝垂直搅拌时，第一圈应紧贴外壳内壁，以使粘性底层即熔剂层实现由层流向有势紊流的转变，这样有利于熔剂上浮，避免夹渣。第二圈搅拌，应位于环形型腔的中心，以扩大紊流区，增大紊流能量，有利于熔剂上浮。

2.2.2 电磁搅拌分析

在含有夹渣物的熔融金属中施加电磁力时，电磁力只产生在导电性良好的熔融金属中，在导电性差的夹杂物中并不产生。因此，夹渣物受到了和电磁力方向相反的力(电磁排斥力)。在拥有一定机械搅拌速度的条件下，电磁场在电导率不同的夹杂物中产生的电磁力的合力由 Leenov 和 Kolin 公式[5]计算：

$$F_p=-\left(\frac{3\sigma_1-\sigma_p}{22\sigma_1+\sigma_p}\right)\times(\pi d_p^3/6)F \tag{3}$$

非金属夹杂物电导率趋近于零，这时式(3)为：

$$F_p=-(3/22)\times(\pi d_p^3/6)F \tag{4}$$

式中，F_p 为电磁排斥力；σ_1 为熔体电导率，σ_p 为非金属夹杂物电导率；d_p 为夹杂物颗粒直径；F 为电磁体积力，其表达式为[5]：

$$F=J\times B=\sigma\omega B^2\delta=2B^2\sqrt{\pi f\sigma/\mu} \tag{5}$$

由于电流的肌肤效应，金属熔体内部的磁感应

强度为[6]；

$$B=B_0^2\cdot e^{-\sqrt{\pi f\sigma\mu}}\cdot x \tag{6}$$

将式(6)带入式(5)得到电磁力沿传播方向在熔体内的分布规律为：

$$F=J\times B=2B^2\cdot\sqrt{\pi f\sigma/\mu}\cdot e^{-2\sqrt{\pi f\sigma\mu}\cdot x} \tag{7}$$

式中，σ 金属熔体的电导率，S/m；μ 熔体的导磁率，H/m；ω 感应电流的角频率，$\omega=2\pi f$；δ 金属熔体的集肤深度，$\delta=\sqrt{1/\pi f\sigma\mu}$；$f$ 感应电流的频率，Hz；B_0 金属熔体表面处的有效感应强度，T；x 距离熔体表面的距离，mm。

从式(7)求出，任一金属熔体颗粒在距熔体表面 x(mm)处所受到的电磁力。

上式中的集肤深度 δ 对搅拌过程也是一个重要的影响因素。根据集肤深度定义式 $\delta=\sqrt{1/\pi f\sigma\mu}$ 可知，对于金属熔体，当频率较高时，电磁场的集肤深小，主要集中在熔体表面附近，此时电磁力主要表现为作用于熔体表面的约束力，搅拌作用相对较小。随着电磁场频率的下降，磁力线逐渐渗入熔体内部，电磁力的回旋部分逐渐增加，强迫对流得到加强，以使熔剂更容易上浮。

通过以上计算可知在生产中，在保证感应温度的前提下，应降低感应工作频率，以利于熔渣的上浮，经多批次试验也验证了该结果(见表 6)。

表6 铸件感应频率工艺参数表

Tab.6 Casting induction frequency process parameter table

批次号	1813	1814	1815	1816	1817	1818	1819
感应频率(kHz)	8.3	8.2	8.2	8.1	8.1	8.0	7.9
感应电压 /V	160±10	180±10	260±10	280±10	300±10	350±10	400±10
夹渣报废率	12%	13%	10%	9%	9%	5%	8%

3 结论

(1)根据该零件特点制定的工艺总路线制定合理，工艺参数稳定有效，经理化和无损检测，产品达到验收要求，通过试制确定感应温度为 815±5 ℃，线圈感应电压为 350±10 V 为最佳参数。

(2)从对粘性理论进行分析可以看出，两次人工搅拌过程中，应选用直径在 1.2 mm 以下的钨丝，第一圈搅动应紧贴外壳内表面，第二圈搅拌应位于环形型腔的中心。

(3)在保证感应温度的前提下，应降低感应频率，感应强度增大，强迫对流得到加强，以使熔剂更容易上浮。降低感应频率的同时，夹渣物受到的作用力增大，也有利于熔剂上浮。生产中用电压控制更为易于操作。

参考文献：

[1] 李传栻. 铸造工程师手册[M]. 北京：机械工业出版社，2003.
[2] 唱鹤鸣. 感应炉熔炼与特种铸造技术[M]. 北京：冶金工业出版社，2002.
[3] 张军. 双金属复合铸造工艺的研究[D]. 郑州：郑州大学，2006.
[4] 乔中华. 流体力学[M]. 太原：山西科学技术出版社，2001.
[5] Mario Tama. Development of Channel of Core Induction Furnaces [J]. Industrial Heating, 1974(6):43-45.
[6] 潘天明. 现代感应加热装置[M]. 北京：冶金工业出版社，1996.

技术资料邮购

《铸件均衡凝固技术及应用实例》

本书由西安理工大学魏兵教授编著。共8章：1、铸铁件均衡凝固与有限补缩；2、铸铁件冒口补缩设计及应用；3、压边浇冒口系统；4、浇注系统大孔出流理论与设计；5、铸件均衡凝固工艺；6、铸钢、白口铸铁、铝、铜合金铸件的均衡凝固工艺；7、浇注系统当冒口补缩设计方法；8、铸件填充与补缩工艺定量设计实例。全书320页。

特快专递邮购价：226元。

邮购咨询：李巧凤　　电话/传真：029-83222071　　技术咨询：13609155628