

铸件成形工艺

Ti321 钛合金轴箱铸件石墨型铸造工艺研究

范世玺^{1,2,3}, 赵瑞斌^{1,2,3}, 肖强伟^{1,2,3}, 南海^{1,2,3}

(1. 北京百慕航材高科技股份有限公司, 北京 100094; 2. 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095; 3. 北京市先进钛合金精密成型工程技术研究中心, 北京 100095)

摘要: **目的** 研究钛合金高铁轴箱铸件采用石墨铸型工艺时, 铸件尺寸、成形及内部质量控制技术。**方法** 通过对高铁轴箱铸件的结构特点进行分析, 针对铸件结构复杂、尺寸比较大、铸件成形比较困难、容易变形的特点, 开展了铸型结构设计、铸件尺寸控制技术和铸件成形工艺等方面研究。采用多活块组合的石墨铸型, 设计底注开放式浇注系统, 利用 Procast 软件对高铁轴箱铸件的浇注方案进行了模拟分析。选用 Ti321 合金, 设定合理的浇注参数, 利用真空自耗电极凝壳炉对铸件进行浇注。**结果** 铸件成形良好, 经过热等静压和后精整后的铸件, 铸件内外部冶金质量和性能指标, 满足客户标准要求, 验证了方案的合理性。**结论** 铸件的计算机模拟对铸件工艺的设计提供了技术支撑, 高铁轴箱铸件采用的石墨型浇注工艺比较合理。

关键词: 钛合金; 轴箱铸件; 石墨型工艺

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2018.03.010

中图分类号: TG292 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2018)03-0055-05

Graphite Casting Technology of Ti321 Titanium Alloy Axle Box Casting

FAN Shi-xi^{1,2,3}, ZHAO Rui-bin^{1,2,3}, XIAO Qiang-wei^{1,2,3}, NAN Hai^{1,2,3}

(1. Baimtec Material Co., Ltd., Beijing 100094, China;

2. AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China;

3. Beijing Engineering Research Center of Advanced Titanium Alloys Precision Forming Technology, Beijing 100095, China)

ABSTRACT: The paper aims to research dimension, forming and internal quality control technology of castings when casting titanium high-speed axle box with graphite mould. Based on analysis of structural characteristics of high speed axle box castings, the casting structure was designed in view of complex structure, large size and difficult deformation of casting. Casting dimension control technology and casting molding technology were researched. With die insert combination of graphite mould, an open gating system for bottom casting was designed. And the casting scheme of high-speed axle box was simulated and analyzed by Procast software. Reasonable casting parameters were selected to cast with Ti321 alloy in vacuum consumable electrode furnace. After HIP and finishing, internal and external metallurgical quality and performance indicators of castings met customer requirements. The rationality of the scheme was verified. Computer simulation of casting provides technical support for design of casting process. It is reasonable to take graphite casting process for high-speed axle box casting.

KEY WORDS: titanium alloy; axle box casting; graphite technology

钛合金具有比强度高、抗腐蚀性强、耐热性能好等优良性能^[1-2], 是航空和航天工业中最有发展前途

的结构材料之一, 伴随着钛合金制造工艺的提高和原材料成本的不断降低, 钛合金应用领域不断扩大, 在

收稿日期: 2018-04-19

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)(2013AA031003)

作者简介: 范世玺(1974—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为钛合金铸造工艺。

兵器、电子、化工以及其他工业上应用广泛。

钛合金石墨型铸造工艺通常是采用人造石墨块经机械加工成铸型,浇注金属液体凝固后获得铸件的一种工艺方法。与砂型、熔模铸型相比,石墨铸型的激冷能力强,细化合金组织,提高铸件的力学性能;同时由于石墨铸型的热化学稳定性好,熔融金属与铸型接触时一般不发生化学反应,铸件表面质量较好;石墨型线胀系数低,抗变形能力强,故铸件尺寸精度高,并且石墨强度比较高,硬度低容易加工成形,铸型的外模还可以回收利用,在一定程度上可以降低铸件的生产成本和交付期限。

在高速铁路机车上,轴箱是车辆转向架的核心部件之一,套在轴颈上联结转向架轮对和构架^[3]。其作用是把车体重量和载荷传递给轮对,润滑轴颈,减少摩擦,降低运行阻力,现在普遍用铸钢制造。每列机

车大约需要 12 件轴箱,每个钢铸件的质量在 120 kg 左右,而采用 Ti321 钛合金轴箱铸件的质量仅仅为 69 kg,为了满足现在高铁对车体轻量化、高速化的要求,北京百慕航材科技股份有限公司开展了制钛合金轴箱铸件研制,根据铸件的结构特点和性能指标要求,采用制作周期较短,成本相对较低的石墨型铸造工艺方案^[4]。

1 铸件的技术要求和结构难点

1.1 铸件的技术要求

铸件选用 Ti321 合金,该合金强度较高,同时具有较高的伸长率,满足铸件的使用要求,其化学性能和力学性能指标分别见表 1 和表 2。

表 1 铸件要求的化学成分(质量分数)

Tab.1 Chemical composition required by casting (mass fraction)

%

Al	V	Fe	Ti	C	N	H	O
2.50~5.00	1.20~3.00	1.00~3.00	基体	≤0.10	≤0.045	≤0.018	≤0.21

表 2 室温下铸件的力学性能要求

Tab.2 Mechanical properties of casting at room temperature

抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	断面收缩率/%
≥700	≥600	≥7	≥12

铸件几何尺寸及公差。铸件几何形状和尺寸符合铸件图样要求,铸件尺寸公差达到 GB/T 6414 的 CT8 级规定。

铸件质量。铸件类别为 II 类,质量等级为 C 级;X 光检测标准及要求:铸件 X 光检验按 GJB 1187 进行,验收按 HB6573 C 级;荧光检测标准及要求:铸件荧光检验按 GJB 2367A—2005 进行,验收按 GJB 2896A—2007 C 级。

1.2 铸件的结构特点和技术难点

轴箱铸件见图 1。轴箱主体呈左右对称^[5],属于

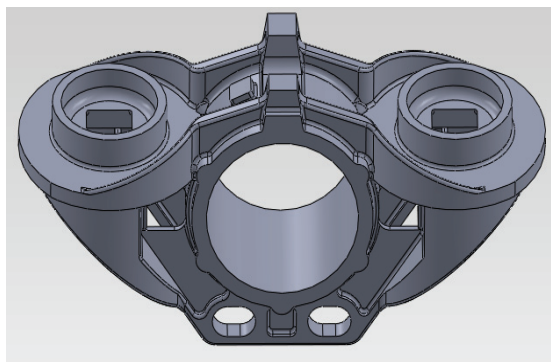


图 1 轴箱铸件

Fig.1 Axle box casting

形状结构较为复杂的铸件^[6],4 处厚大热节,多处凹槽。铸件的轮廓尺寸为 900 mm×350 mm×450 mm,质量约 69 kg,最大壁厚为 80 mm,最小壁厚 10 mm。铸件存在以下技术难点:首先由于铸件外廓尺寸比较大,结构比较复杂,并且铸件所采用的 Ti321 合金流动性比较差,约是 ZTC4 合金流动性的 50%,导致铸件成形难度比较大;其次铸件存在孤立厚大热节,收缩量比较大,易造成铸件变形;再者铸件弧面尺寸精度要求高,容易鼓胀,造成厚度尺寸超差。

2 工艺方案的选择

轴箱的铸造质量直接关系到列车的运行安全^[7],因此需通过优化设计浇注系统,减少铸件缺陷,提高铸件冶金质量。

针对铸件完整成形难度大的技术难点以及轴箱铸件的结构特点,采用的是底注开放式浇注系统(见图 2),静止浇注,直浇道从铸件中心孔入,4 段直径相同的横浇道呈十字交叉分布在铸件的下端,6 个内浇口分散连接在铸件大圆加工端面厚区和弧面处;直浇道处于铸件的中心孔,横浇道比较紧凑,金属液体流程短,减少浇注过程中的合金液体热量损失,避免铸件产生浇不足缺陷的发生,同时直浇道:横浇道:

内浇口的截面积比例为 1：2：3，浇注系统设计比较开放且为底部注入式，金属液体的充填更加平稳，减少紊流的发生。

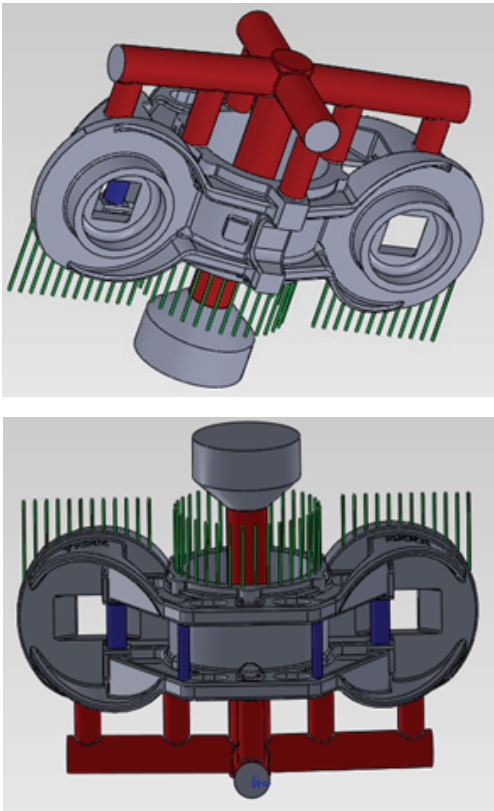
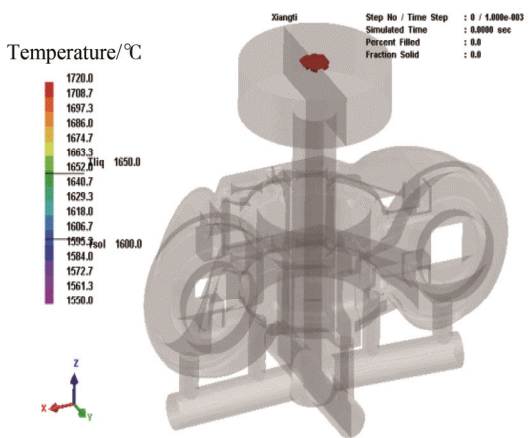


图 2 轴箱铸件试制工艺方案

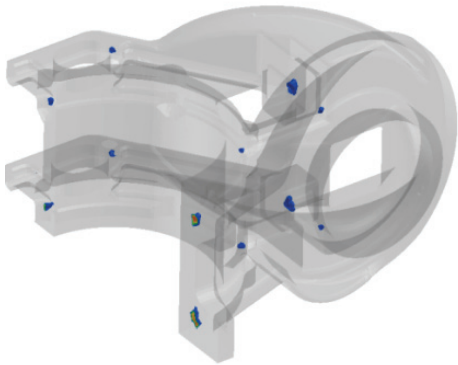
Fig.2 Process scheme for trial-produce of axle box casting

针对铸件容易变形的特点，在铸件的热节和框处，连接 4 根工艺筋（见图 2），减少铸件的变形，同时还能起到辅助浇口的作用，提高铸件的成形能力。由于石墨铸型的透气性比较差，在铸件上端面开设多处直径 5 mm 的出气孔，以免铸型产生憋气，导致铸件产生冷隔、气孔浇不足等缺陷。由于铸件的结构比较复杂，收缩时石墨铸型对铸件的抗变形能力比较强，铸件的收缩量相对比较小，参照类似铸件的生产经验，铸件 xyz 方向的收缩率定为 0.7%~1.0%^[8]，部分厚大区域收缩比较大，采用加工工艺补正量进行补正。

计算机模拟凝固技术为铸造工艺的合理设计提供了理论基础和和实施依据^[9]，铸件进行工艺设计后，先对轴箱进行无冒口的纯凝固传热计算，通过“瞬间充型，初温均布”假设，只考虑凝固过程，没有考虑充型的影响^[10—11]，可以快速确定缩孔、缩松的分布位置；通过采用图 4 轴箱工艺方案的模拟分析，可以知道，轴箱铸件金属流动比较平稳，充型比较完整，充型能力比较强，顶部厚大区域有缩孔问题，但缩孔体积比较小，不用加设额外的冒口，热压后铸件的缩孔可以压实。轴箱铸件模拟结果见图 3。



a 铸件凝固过程模拟结果



b 铸件缩孔分布

图 3 轴箱铸件模拟结果

Fig.3 Simulation results of axle box casting

石墨铸型选用优质人造石墨块进行加机加工制作^[12]，因为铸件和浇注系统比较复杂，铸型采用多活块组合设计（见图 4），活块之间的装配采用定位孔和芯头定位；由于石墨加工精度比较高，所以活块之间的装配间隙比较小，有利于保证铸件的尺寸精度。

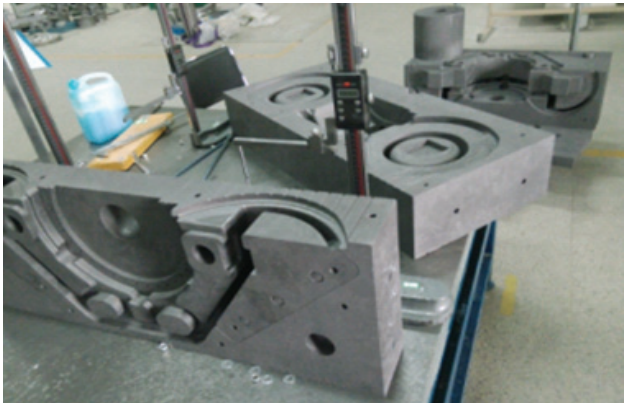


图 4 轴箱铸件铸型结构

Fig.4 Die structure of axle box casting

3 铸型除气和浇注

加工好的石墨铸型及型芯，含有一定的水分，在

常温下容易吸附气体和水分^[13],浇注时铸型及型芯往往会析出气体及水分和高温的钛合金熔体发生反应,会造成铸件产生铸造缺陷,所以必须在浇注前除掉这些杂质;铸型及型芯必须在真空炉内除气^[14],铸型装炉后,先将炉内抽真空,当真空炉内真空度 ≤ 6 Pa,开始缓慢加热至 930 ℃,保温 2 h 左右,然后缓慢冷却到 300 ℃ 以下出炉。

经过除气后的石墨铸型在真空自耗电极凝壳炉内进行浇注^[15],如果除气的铸型不能及时浇注,铸型暴露在空气中不应超过 24 h,应存放在设定温度 150 ℃ 的烘箱内进行保温,并合理安排浇注时间。轴箱铸件采用 Ti321 合金,流动性比较差,且石墨铸型导热系数大,激冷效果比较好,铸件完整成形难度比较大,所以装炉后的石墨型壳温度控制在 (200±50) ℃,通过提高铸型的温度,来保证钛合金的充填能力,避免浇不足缺陷的发生。轴箱铸件熔铸熔炼和浇注在 150 kg 真空自耗凝壳炉中进行,当炉内真空度小于 6 Pa 时开始熔炼,当钛合金熔化至规定重量后,立即进行浇注石墨铸型,浇注后的铸型要在凝壳炉内冷却 1 h 后才可以开炉门,防止过早的打开炉门,铸件没有完全冷却,导致铸件产生开裂变形。

表 3 铸件的化学成分 (质量分数)
Tab.3 Chemical composition of casting (mass fraction)

Al	V	Fe	C	N	H	O
4.18	2.13	1.0	0.01	0.02	0.001	0.13

表 4 铸件附铸试样力学性能
Tab.4 Mechanical properties of casting specimen

抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	断面收缩率/%
836	767	17.5	30

荧光检测 2 次即合格,表面质量比较好,最终铸件经过尺寸划线检验满足客户要求。

5 结论

针对轴箱铸件的结构特点和技术难点,采用石墨铸型铸造的工艺方案设计,研究表明大尺寸、复杂结构的铸件,由于石墨抗变形能力比较强,通过设计合理的工艺筋和铸件收缩比例,开设多活块组合的石墨铸型,浇注后铸件的尺寸没有明显的变形,经过尺寸检验,铸件尺寸符合图纸要求;同时轴箱铸件成形难度大,通过采用底注开放式浇注系统及合理的浇注参数,利用软件模拟铸件的成形和缩松及缩孔情况,优化浇注系统设计,浇注后的铸件成形良好,铸件的内部质量和表面质量满足客户要求;总之,轴箱铸件采用石墨型铸造工艺,设计的底注开放式浇注系统和防

4 铸件的试制结果

因为 Ti321 合金流动性比较差,尽管铸件的出气孔没有完全充满,但轴箱铸型在浇注前预热,可以提高钛合金熔体的充型能力,其次浇注系统设计合理,钛合金熔体流动比较平稳,所以铸件成形良好。浇注清理后的轴箱铸件见图 5。



图 5 浇注清理后的轴箱铸件
Fig.5 Axle box casting after cleaning

经过检测铸件的力学性能和化学成分见表 3 和表 4,完全满足客户的标准要求。铸件经过热压后没有明显的压坑,内部质量较好;铸件酸洗、打磨后,

止变形的方案是完全可行的。

参考文献:

- [1] 王新英, 谢成木. 国内外钛合金精密铸造型壳材料的发展概况[J]. 特种铸造及有色合金, 2001, 21(3): 40—42.
WANG Xin-ying, XIE Cheng-mu. Development of Shell Mold Materials for Ti Alloy Investment Casting in Domestic and Foreign Countries[J]. Special Casting & Non-ferrous Alloys, 2001, 21(3): 40—42.
- [2] 胡和平, 杨学东, 郑申清. 钛合金泵体铸造工艺研究[J]. 材料开发与应用, 2010, 25(1): 35—37.
HU He-ping, YANG Xue-dong, ZHENG Shen-qin. Study on Casting Process for Titanium Alloy Pump Body[J]. Development and Application of Materials, 2010, 25(1): 35—37.

- [3] 刘峻岭, 蔺国隆, 王晶, 等. 高速铁路货车转向架轴箱铸件研制[J]. 铸造, 2017, 66(5): 481—485.
LIU Jun-ling, LIN Guo-long, WANG Jing, et al. Casting Development of High Speed Railway Freight Car Bogie's Axle Box[J]. Foundry, 2017, 66(5): 481—485.
- [4] 苏贵桥, 谢华生, 张春辉, 等. 钛合金薄壁件铸造用石墨铸型红外预热工艺的研究[J]. 铸造, 2004, 53(3): 194—196.
SU Gui-qiao, XIE Hua-sheng, ZHANG Chun-hui, et al. Study on Infrared Preheating Process of Graphite Mould for Thin-walled Titanium-alloy Casting[J]. Foundry, 2004, 53(3): 194—196.
- [5] 邹建美, 张学云. Y25 型转向架用轴箱制造工艺[J]. 轨道交通装备与技术, 2013(1): 15—17.
ZOU Jian-mei, ZHANG Xue-yun. Y25 Type Bogie with the Axle Box Manufacturing Process[J]. Railway Locomotive & Rolling Stock Workers, 2013(1): 15—17.
- [6] 李强, 李建国, 李殿中, 等. 客车轴箱铸件在凝固过程中的缺陷预测[J]. 铸造, 2004, 53(3): 220—223.
LI Qiang, LI Jian-guo, LI Dian-zhong, et al. Prediction of the Defects Appearing in the Casting of Train's Axis Box[J]. Foundry, 2004, 53(3): 220—223.
- [7] 胡瑞生, 张励忠. CCDZ50 型转向架轴箱铸造工艺模拟[J]. 铸造, 2008, 57(2): 154—156.
HU Rui-sheng, ZHANG Li-zhong. Casting Process Simulation of CCDZ50 Type Bogie's Axle Box[J]. Foundry, 2008, 57(2): 154—156.
- [8] 王华侨, 包春玲, 王永凤, 等. 大型薄壁钛合金菱形骨架铸件铸造工艺的研究[J]. 铸造, 2015, 64(2): 135—139.
WANG Hua-qiao, BAO Chun-ling, WANG Yong-feng, et al. Study on Casting Process of Large Thin-Wall Diamond Skeleton Titanium Alloy Casting[J]. Foundry, 2015, 64(2): 135—139.
- [9] 夏少华, 朱正峰, 徐贵宝. EMD 轴箱铸钢工艺研究[J]. 铸造设备与工艺, 2013(1): 8—9.
XIA Shao-hua, ZHU Zheng-feng, XU Gui-bao. Research on the Process of EMD Adaptor Steel Casting[J]. Foundry Equipment and Technology, 2013(1): 8—9.
- [10] 陈立亮, 刘瑞祥. 华铸 CAE/InteCAST 集成系统使用手册[M]. 武汉: 华中科技大学铸软件中心, 2009.
CHEN Li-liang, LIU Rui-xiang. HuaZhu CAE/InteCAST Integrated System Manual[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Software Center, 2009.
- [11] 周建新, 廖敦明. 铸造 CAD/CAE[M]. 北京: 北京化学工业出版社, 2009.
ZHOU Jian-xin, LIAO Dun-ming. Casting CAD/CAE[M]. Beijing: Beijing Chemical Industry Press, 2009.
- [12] 伞晶超. 钛合金叶轮石墨型离心铸造工艺优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2014, 34(4): 413—415.
SAN Jing-cai. Centrifugal Casting Process Optimization with Graphite Mould for Titanium Alloy Impeller[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2014, 34(4): 413—415.
- [13] 游涛, 吴鹏, 姚谦, 等. 一种钛合金镜筒的石墨型离心铸造工艺[J]. 铸造, 2012, 61(4): 434—436.
YOU Tao, WU Peng, YAO Qian, et al. Centrifugal Casting Process with Graphite Mould for a Titanium Alloy Lens Cone[J]. Foundry, 2012, 61(4): 434—436.
- [14] 史兴利, 郑子樵. 钛及钛合金铸造用石墨型的制造[J]. 铸造, 1998, 47(3): 37—39.
SHI Xing-li, ZHENG Zi-qiao. In the Manufacturing of Titanium and Titanium Alloy Foundry Type Graphite[J]. Foundry, 1998, 47(3): 37—39.
- [15] 范善君. 钛合金导轮的石墨型铸造[J]. 特种铸造及有色合金, 1992, 12(1): 15—17.
FAN Shan-jun. Graphite Mold Casting Titanium Alloy Wheel[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 1992, 12(1): 15—17.