

ZL101A 合金摇枕座铸件铸造工艺研究

金泰木¹, 高艳丽^{2,3}, 黄 粒^{2,3}, 杜旭初^{2,3}, 丁小明^{2,4}, 展旭和^{1,4}

(1. 国家高速列车青岛创新中心, 山东青岛 266109; 2. 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095; 3. 北京市先进铝合金材料及应用工程技术研究中心, 北京 100095; 4. 航材国创(青岛)高铁材料研究院有限公司, 山东青岛 266109)

摘要: 摇枕座铸件为ZL101A合金, 是高速磁浮车走行部件的关键部件。文中针对ZL101A摇枕座铸件的结构特点与性能要求, 分析了该铸件的铸造工艺特点, 开展了ZL101A合金综合性能优化研究。从成分优化、晶粒细化、熔体处理以及铸造工艺方案设计、铸造ProCAST数值仿真五个方面进行了技术研究。结果表明: 采用高纯原料, 配合晶粒细化、初生硅球化, 可有效提升ZL101A合金的综合性能; 采用低压浇注工艺, 配合底注式浇注系统和厚大部位放置冷铁的铸造工艺, 可制备出内部质量良好的摇枕座铸件, 满足设计指标要求。

关键词: ZL101A; 摇枕座; 数值模拟; 低压铸造

作者简介:

金泰木(1970-), 男, 高级工程师, 主要从事铝合金铸件工艺研究及开发。
电 话: 0532-89015009,
E-mail: jintaimu@innohst.com

通讯作者:

杜旭初, 男, 高级工程师, 博士。电话: 010-62497414, E-mail: torden@139.com

中图分类号: TG292

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2020)06-0640-07

基金项目:

国家高速列车技术创新中心建设专项科技研发项目(2019JK-0201)。

收稿日期:

2019-11-26 收到初稿,
2020-03-20 收到修订稿。

高速磁悬浮列车将满足中国大城市点对点之间的运输要求, 在技术带动和国际竞争中有重要的战略意义^[1]。铝合金摇枕座铸件是磁悬浮列车悬浮架的重要组成部分, 为实现高速列车装备减重、提高整体结构性能, 开展摇枕座铝合金铸件的研发十分必要。ZL101A合金是亚共晶铝硅合金, 金属液流动性好, 凝固收缩率低, 常用于生产气密性要求较高的铸件, 且其热裂倾向小, 经变质处理后, 合金具备良好的综合服役性能^[2-3], 所以磁浮车走行部件均选用ZL101A合金。

本文以摇枕座铸件为研究对象, 综合考虑合金特性和摇枕座铸件的结构特点、服役要求, 从铸造工艺和熔体处理方面入手, 进行了分析研究, 结果具有普适性, 可为其他悬浮架用关键部件提供工艺设计参考, 为高速磁悬浮列车的发展提供技术支撑。

1 铸造工艺设计

1.1 铸件结构特点及技术要求

1.1.1 铸件结构及使用特点

摇枕座铸件具有如下特点: ①壳体结构, 内含加强筋, 铸件外形尺寸为835 mm×320 mm×236mm(图1); ②壁厚小, 平均壁厚约6 mm, 且存在热节区; ③摇枕座铸件为高速磁浮车走行部重要结构部件, 在服役过程中承受一定的疲劳载荷, 要求铸件具备良好的可靠性。

1.1.2 技术要求

摇枕座铸件主要技术指标: 材料选用GB/T 1173—2013中ZL101A合金, 铸件为GB/T 9438—2013中Ⅰ类铸件。铸件内部圆形及长形针孔均不超过1级, 海绵状和分散状疏松均不超过1级。铸件本体切取力学性能: $R_m \geq 290$ MPa, $R_{p0.2} \geq 240$ MPa, $A_5 \geq 5\%$; 尺寸精度为CT8级, 且底部圆盘平面度不大于0.5 mm。

1.2 铸造工艺分析

摇枕座铸件壁薄, 且为半封闭结构。在浇注时, 需适当提高浇注温度与充型

速度。但浇注温度不能过高, 过高容易导致铸件组织疏松; 若充型过快, 则导致铸件卷气、夹杂。此外, 铸件前部装配部位有厚大凸台, 由于铸件整体壁薄、补缩通道窄, 不易补缩, 厚大凸台易出现局部疏松缺陷。

摇枕座为 I 类铸件, 对铸件内部针孔、疏松缺陷控制要求较高, 因此熔体冶金质量控制是铸件研制的技术难点。在保证铸件完整充型的情况下, 需重点控制熔体的含气量和夹杂; 在厚大部位, 需加强激冷, 保证局部组织致密。

1.3 铸造工艺方案

综合考虑铸件形状、尺寸、壁厚、尺寸精度、内部质量要求等, 摇枕座铸件采用树脂砂型精密铸造方法进行铸造, 对于装配精度要求高的部位和壁厚要求严的部位通过设置加工余量, 最后通过机械加工的方式保证; 其余部位的尺寸由模具保证。

1.3.1 浇注系统设计

根据铸件结构特点和要求, 结合类似铸件研制经验, 拟定摇枕座的浇注工艺方案: 采用底注式浇注工艺, 浇注系统的设计如下:

合金液在浇注温度下可视为牛顿液体, 根据阿哲公式^[4], 内浇道总截面积:

$$F_{\text{内}} = G / \rho v \tau \quad (1)$$

式中: $F_{\text{内}}$ 为内浇道总截面积 (cm^2), G 为浇注重量 (g), ρ 为铝液密度 (g/cm^3), v 为内浇道出口速度 (cm/s), τ 为充型时间 (s)。

为保证内浇道充填不出现紊流, 内浇口处线速度不能超过 $150 \text{ cm}/\text{s}$, 代入式 (1) 得:

$$F_{\text{内}} = G / 150 \rho \tau \quad (2)$$

充型时间 τ (液体在型腔内上升时间) 由 $v_{\text{升}}$ 和铸件高度 h 确定, 即

$$\tau = h / v_{\text{升}} \quad (3)$$

可以根据金属液的浇注重量和充型时间确定内浇道的总截面积, 再根据流量分配和温度分布设置内浇道具体的位置。内浇道截面尺寸确定以后, 再选择横浇道的截面面积。对于铝合金液用开放式的浇注系统即 $\Sigma A_{\text{内}} > \Sigma A_{\text{横}} > \Sigma A_{\text{升液管出口}}$, 其比值为 $(2 \sim 2.3) : (1.5 \sim 1.7) : 1$ 。摇枕座铸件浇注工艺见图2。

1.3.2 铸造方法

采用精密树脂砂型铸造, 型芯采用易溃散激冷砂型芯工艺。

1.3.3 浇注工艺仿真计算

对设计的浇注工艺采用 ProCAST 模拟软件进行模

拟计算, 摇枕座铸件剖分网格见图3, 模拟采用的浇注工艺参数如表1所示, 模拟结果见图4、图5和图6。

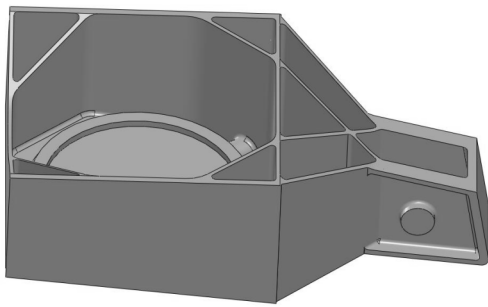


图1 摇枕座铸件三维数模

Fig. 1 3D model of body bolster casting

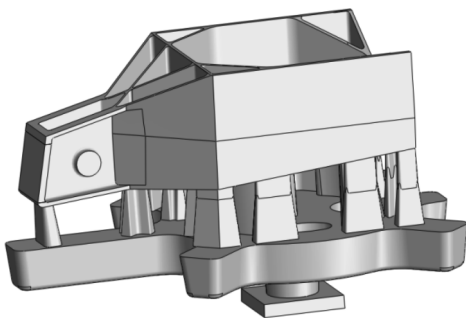


图2 摇枕座铸件浇注工艺

Fig. 2 Casting process of body bolster casting

表1 铸件浇注工艺参数

Table 1 Pouring process parameters of casting

升液速度 /($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	充型速度 /($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	升液压力 /kPa	充型压力 /kPa	结壳 时间/s	保压压 力/kPa	浇注 温度/ $^{\circ}\text{C}$
50	50	25	50	1 200	75	710

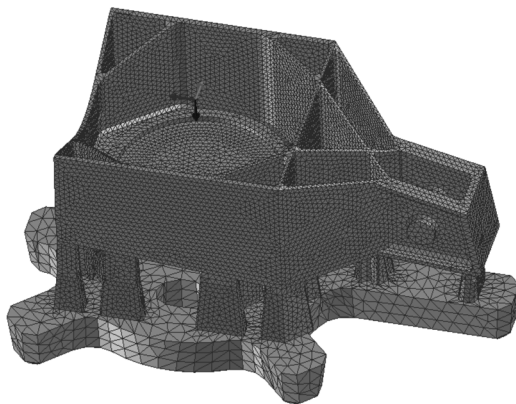


图3 摇枕座铸件剖分网格

Fig. 3 Subdivision mesh of body bolster casting

从图4和图5可以看出,金属液充型后在凝固过程中摇枕座铸件温度梯度分布合理,最后凝固的区域集中在底部浇注系统上,这样可保证铸件在凝固时按顺序凝固,铸件可获得较好的组织及较高的力学性能。图6为根据Niyama判据判断疏松可能出现的位置。可以看出,该工艺条件下,热节部位并无明显疏松,疏松主要存在铸件端头两侧厚大部位,这与凝固温度场分布结果一致。

图7为摇枕座浇注过程中氧化夹杂分布示意图。图8是模拟铝液充型时的流动示踪。结合图7和图8可以看出,低压充型时铝液能平稳充型,无卷气现象。金属液进入横浇道时,产生涡流,然后平稳向上充型至铸件本体,因此氧化夹杂主要集中于横浇道中,铸件本体中夹杂含量非常少。综合以上模拟结果,可以看出,摇枕座工艺设计基本合理,端头厚大部位(凸台的位置)的疏松可以通过设置冷铁解决(冷铁直径和凸台直径一致,冷铁厚度为该处壁厚的1.5倍);同时在横浇道与内浇道交汇处设置过滤网,可进一步减少铸件本体中的夹杂含量。

1.4 模具设计

根据数值模拟结果,确定了铸件浇冒系统、冷铁的分布、结构尺寸和数量。据此,设计铸件模具及相关工装,设计图如图9所示。

铸件的缩尺采用验证法,先根据经验设置统一的收缩率为1.1%,根据设计采用3D打印技术打印一套铸型,浇注铸件,根据浇注结果,测算实际收缩率,并指导模具设计。

2 结果与分析

2.1 ZL101A 合金处理

2.1.1 合金成分优化

摇枕座铸件力学性能显著高于GB/T 1173中的ZL101A合金性能要求,因此需对合金成分进行优化调控,提高合金的综合性能。

通过采用高纯原材料,控制合金中Fe含量,减少富Fe相析出。摇枕座铸造用原材料选用高纯铝锭(纯度99.99%)、高纯镁锭(纯度99.8%)、自制Al-12Si中间合金(高纯铝锭与99.98%纯度单质硅配制)以及进口AlTi5B1A丝材,严格控制外来杂质引入。同时,所用搅拌工装、扒渣工装、炉体内衬表面均匀喷涂涂层(涂料成分:10%氧化锌、10%水玻璃、10%碳酸钙以及余量的水),阻隔铁制工具的渗Fe,最终Fe含量控制在0.1%以内,纯化熔体。同时,由于铸件伸长率指标要求较高,需将Si、Mg控制在中限,适当降低初生硅以及后续Mg₂Si相的含量;加强晶粒细化作用,Ti元

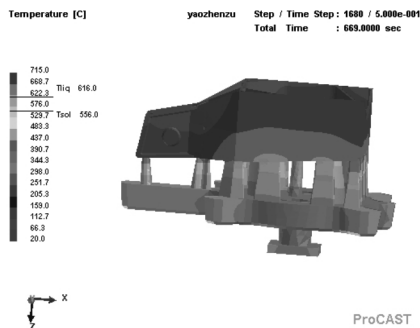


图4 摇枕座凝固温度场

Fig. 4 Solidification temperature field of body bolster casting

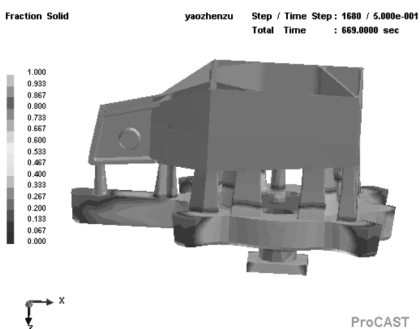


图5 摇枕座凝固固相率

Fig. 5 Solidification phase ratio of body bolster casting

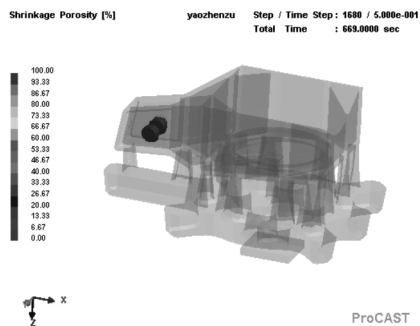


图6 摇枕座凝固疏松区

Fig. 6 Solidification porosity of body bolster casting

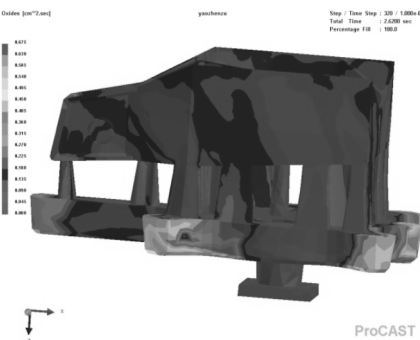


图7 摇枕座氧化夹杂示意图

Fig. 7 Distribution diagram of oxide inclusions after solidification

素取标准要求的上限。摇枕座化学成分如表2所示。

2.1.2 晶粒细化

本文添加AlTi5B1A丝材，细化铸件微观组织。在砂型铸造过程中，合金液熔炼持续时间较长，Al-Ti-B中间合金加入金属液后，由于Ti在铝液中的溶解度仅0.14%，过量的Ti元素难以完全溶入铝液，而以 Al_3Ti 和 TiB_2 金属间化合物的形式悬浮在铝合金液内^[5]。随着熔炼时间增加，由于Ti元素密度高于Al，含Ti金属间化合物会不断下沉、团聚，最后沉积在坩埚底部，大大弱化合金细化效果。而造成合金细化效果弱化的主要原因是合金液在坩埚内长时间停留导致形核核心沉底，可用形核核心减少，因此适当减少细化剂在熔体内的停留时间，减缓形核核心沉淀，可以提升AlTi5B1A中间合金的细化能力。

采用两步法对熔体进行细化处理，AlTi5B1A丝材

加入方式与文献[5]一致，首次将2/3丝材在Mg锭加入后添加，末次将1/3丝材在浇注前20 min后添加。同时，在熔炼过程中加强熔体搅拌，防止 Al_3Ti 偏聚、沉底，弱化细化效果。细化前后微观组织如图10所示。

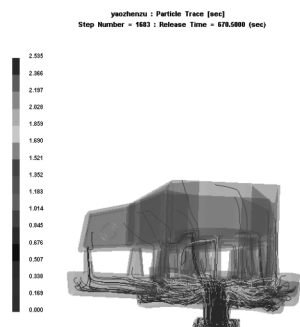


图8 浇注过程示踪粒子

Fig. 8 Tracer particle during the pouring process

表2 摇枕座的化学成分
Table 2 Chemical composition of body bolsters casting

合金	Si	Mg	Fe	Ti	Cu	Mn	Zn	Sn	Pb	$w_B/\%$
ZL101A	6.84	0.33	≤ 0.05	0.14	≤ 0.05	< 0.10	< 0.10	< 0.05	< 0.03	

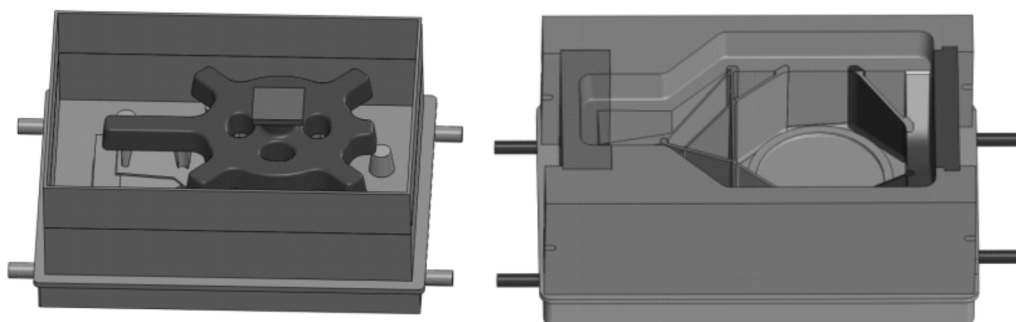
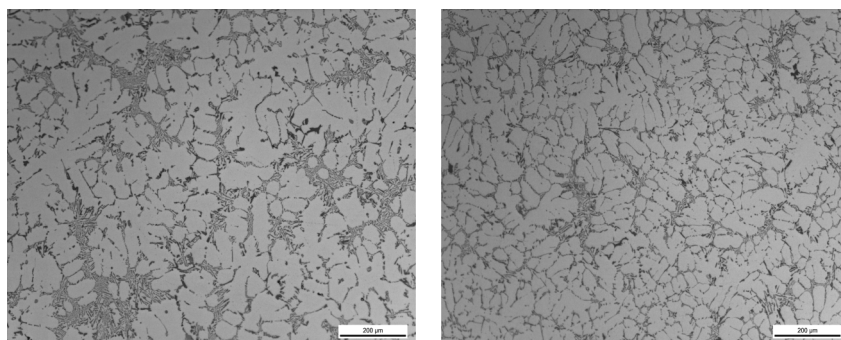


图9 摇枕座铸件主要模具结构图

Fig. 9 Primary mold structure of body bolster casting



(a) 未细化处理

(b) 细化处理后

图10 ZL101A合金金相显微组织

Fig. 10 Microstructure of ZL101A alloy

2.1.3 共晶硅变质处理

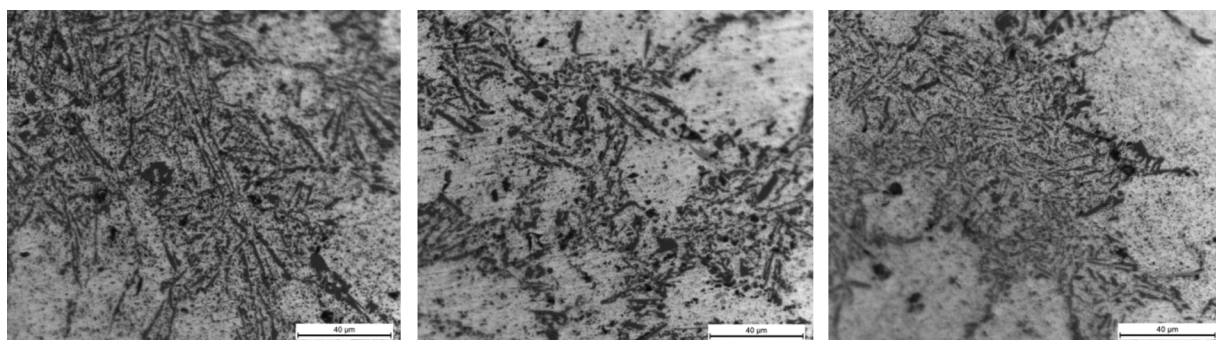
采用熔体过热处理和复合变质对初生硅进行细化、球化。

(1) 熔体高温过热处理-纯化。将铸造ZL101A合金原材料熔炼温度冲温、过热至800℃以上,获得弥散、细小的初生硅组织,明显改善初生硅形貌,并配合真空除气处理,抵消高温带来的熔体吸氢负面效果。

图11是高温熔体处理对ZL101A合金铸态组织共晶硅尺寸的影响。高温790℃,保温10 min时,共晶硅尺寸大多在40 μm左右,也有相当数量共晶硅长度达60~80 μm。高温810℃,保温10 min时,共晶硅尺寸基本不大于40 μm,消除了长度较大的共晶硅。高温830℃时,保温10 min与810℃下保温10 min相比,共晶硅长度变化不大,但共晶硅更加细化。铝熔体为短程有序原子排列,温度越高,原子间距越小^[6],高温处理可以促进Si原子团的均匀、弥散分布,增加凝固过程

中Si元素的析出原子团数量,有效细化初生硅相,析出的硅质点更弥散、更细小。高温处理可以加大碱金属(Na、K、Ca)的烧损,减少熔体吸气倾向,也可有效改善铝合金熔体质量。综合考虑生产效率与高温带来的吸氢负面效果,摇枕座熔体高温温度选择830℃,保温10 min。

(2) ZL101A合金复合变质处理技术-细化共晶组织。在Al-Si合金变质方面,目前生产中常用的变质剂为含Na、Sr盐,虽然具有较好的变质效果,但会造成铸件含气量高,特别是加Na变质后的合金液有效时间很短,通常只有30~60 min^[7],不能完全满足工程化应用需求。因此,本文针对摇枕座铸件连续浇注的工程化应用需求,采用新型高效复合变质剂(Te/Sb二元复合变质剂),提高变质剂有效作用时间,优化、改善变质效果,进一步细化、球化初生硅相,提升合金流动性能。



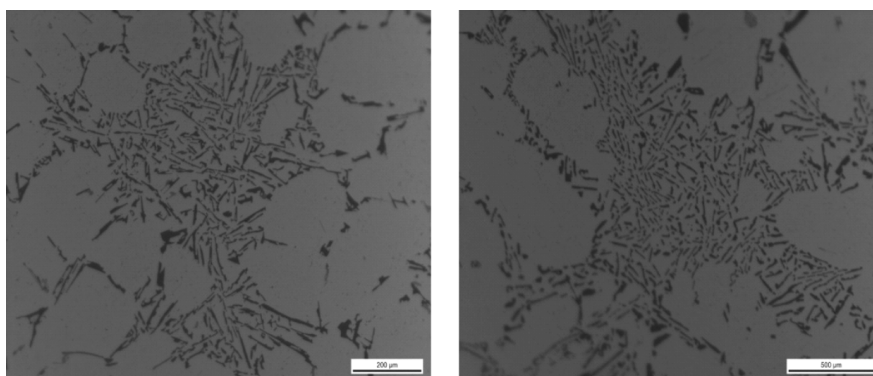
(a) 冲高温790℃

(b) 冲高温810℃

(c) 冲高温830℃

图11 冲高温熔体处理后的ZL101A合金铸态组织

Fig. 11 Microstructures of as-cast ZL101A alloy after impulse high temperature treatment



(a) 未变质

(b) 变质处理

图12 ZL101A合金铸态共晶组织

Fig. 12 Eutectic microstructure of as-cast ZL101A alloy

在熔体高温处理后,加入微量二元复合变质剂(添加量为铝熔体的0.15%, $\text{Te}:\text{Sb}=1:1$)。图12为冲高温后不添加变质剂与加入变质剂的铸造微观组织。可以看出,加入微量复合变质剂后,高温后的铸态共晶硅组织更加细化,且共晶硅均变为短棒状或球状,这对提高合金综合力学性能十分有利。

(3) 熔体抽真空处理-净化。熔体高温后其含气量会随之升高。为降低熔体中的气体含量,对熔体在800 Pa压力下真空抽气处理,抽气0~20 min的熔体氢含量如表3所示。可以看出,在800 Pa压力下,抽气15 min后熔体中氢含量基本保持不变。

因此,摇枕座铸件真空抽气参数选择为800 Pa下抽气15 min。

2.2 模具加工

模具采用铸铝材料,冷铁为普通碳钢。

2.3 试制结果

按上述浇注工艺以及合金、熔体处理方式,浇注摇枕座铸件(图13),对铸件进行了全面检测,结果如下。

(1) 内部质量。摇枕座铸件经X光检测,铸件内部无明显疏松缺陷,内部质量达到技术指标要求,实现一次试制成功。

(2) 尺寸控制。采用三坐标测试平台对摇枕座进行尺寸检验,所有尺寸合格。

(3) 铸件性能。摇枕座铸件本体切取性能如表4所示,满足指标要求。

3 结论

(1) 通过成分优化、晶粒细化以及熔体变质处理,使ZL101A合金性能明显提高,摇枕座铸件本体切取性能达到 $R_m \geq 296 \text{ MPa}$ 、 $R_{p0.2} \geq 243 \text{ MPa}$ 、 $A_5 \geq 5.7\%$ 。

表3 ZL101A合金经真空抽气处理后铝液中的氢含量
Table 3 Hydrogen content of aluminum melt after vacuum degassing treatment

抽气时间/min	0	5	10	15	20
氢含量/ $[\mu\text{g} \cdot (100\text{g})^{-1}]$	0.28	0.20	0.16	0.10	0.10

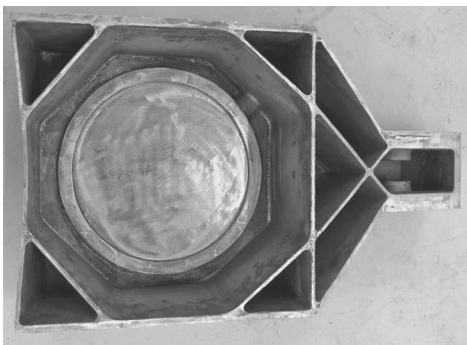


图13 合格的摇枕座铸件

Fig. 13 A qualified body bolster casting

表4 铸件切取性能
Table 4 Mechanical properties of casting itself

试样号	R_m/MPa	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	$A_5/\%$
1	308	245	5.7
2	312	243	10.9
3	300	251	7.6
4	298	246	7.3
5	296	244	8.6

(2) 基于ProCAST模拟计算结果,采用低压浇注方法,配合底注式浇注工艺,研制出合格的摇枕座铸件,满足技术条件要求。

参考文献:

- [1] 严陆光,徐善纲,孙广生,等.高速磁悬浮列车的战略进展与我国的发展战略[J].电工电能新技术,2002,21(4):1-8.
- [2] 郑来苏.铸造合金及其熔炼[M].西安:西北工业大学出版社,1994.
- [3] 葛素静,宗福春,刘闯,等.行业标准《铸造铝合金金相 第1部分:铸造铝硅合金变质》解读[J].铸造,2017(9):1015-1018.
- [4] 刘乃伦,渠晓东.低压铸造内浇口截面积的确定[J].特种铸造及有色合金,1994(4):39.

- [5] 汤皓元, 陈越, 冯绍棠, 等. Al-5Ti-1B晶粒细化剂添加量和细化时间对铝合金细化效果的影响 [J]. 热加工工艺, 2016 (1) : 65-68.
- [6] 郑卫东, 阮磊, 厉沙沙, 等. 晶粒细化工艺对ZL205A合金偏析缺陷的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37 (2) : 792-795.
- [7] 胡庚祥. 金属学原理 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1994.
- [8] 袁成祺. 铸造铝合金、镁合金标准手册 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1994.

Casting Process of ZL101A Body Bolster Castings

JIN Tai-mu¹, GAO YAN-li^{2,3}, HUANG Li^{2,3}, DU Xu-chu^{2,3}, DING Xiao-ming^{2,4}, ZHAN Xu-he^{1,4}

(1. National Innovation Center of High Speed Train, Qingdao 266109, Shandong, China; Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 3. Beijing Engineering Research Center for Advanced Aluminum Alloys, Beijing 100095, China; 4. National Innovation (Qingdao) High Speed Train Material Research Institute Co., Ltd., Shandong, China)

Abstract:

ZL101A alloy body bolster casting is a critical component of the running system of high-speed magnetic levitation. Based on the structure feature of the body bolster casting and the characteristics of ZL101A alloy, the key points of the casting process were analyzed. The study was carried out from five aspects of composition optimization, alloy refinement, melt treatment, casting process design, ProCAST numerical simulation. The results show that the performance of ZL101A alloy is significantly improved by using high purity raw materials, optimizing alloy composition, modifying and treating the alloy melt, and the castings with excellent internal quality can be obtained by using low pressure casting method, bottom gating system and setting chill on the thick, large area.

Key words:

ZL101A; body bolster casting; numerical simulation; low pressure casting
