

B12G32A 铝基轴承合金挡油环部件凝固成形工艺研究

樊振中^{1,2}, 孟李红³, 姜国庆³, 曹 岚³

(1. 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095; 2. 北京市先进铝合金材料及应用工程技术研究中心, 北京 100095;
3. 通用电气能源(杭州)有限公司, 浙江杭州 311231)

摘要: 以B12G32A内挡油环与外挡油环为研究对象, 设计了一种低压浇注凝固成形工艺, 在平缓充型速度下实现了铸件自上而下与自外向内的顺序凝固。对其显微组织与力学性能进行分析测试, 本体试样进行摩擦-磨损试验。结果显示: Al-Sn共晶体受界面张力作用, 以网状包络形貌将初生 α -Al基体焊合在一起, 经140℃时效保温2.5 h后, 本体试样平均抗拉强度、屈服强度与伸长率分别为134.0 MPa、115.3 MPa与15.3%。摩擦-磨损过程中低熔点Sn相不断被挤压成片状, 粘着转移均匀覆盖在摩擦副表面, 起到了良好的自润滑效果。

关键词: B12G32A合金; 凝固工艺; 显微组织; 力学性能; 低压铸造

作者简介:

樊振中(1985-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为新型轻质合金材料与大型复杂构件精确成形制造控制。电话: 010-62497153, E-mail: fanzhenzhong2010@163.com

中图分类号: TG292

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2019)

02-0186-06

收稿日期:

2018-11-20 收到初稿,

2018-12-05 收到修订稿。

20世纪中叶以来, 燃气轮机为现代航空、航海动力奠定了基础, 并逐步进入石油、化工、冶金、发电等领域, 现已成为高效火电能源的核心动力装备之一, 目前燃气轮机联合循环发电总量已经达到全球发电总量的五分之一, 欧美等国家已超过三分之一^[1]。燃气轮机目前正朝着大容量、高温比、高压压缩比、高效率、低污染的方向发展, 目前燃气轮机燃气初温可达1 370~1 500℃, 排气温度约为450~600℃。燃烧室燃油喷嘴是燃气轮机的一个关键部件, 其燃油的雾化质量直接影响燃烧室的混合、点火、燃烧效率, 其中挡油环部件直接影响燃油喷嘴的工作流量和稳定性^[2-3]。

挡油环部件由于在高速运转过程需要承担一定的载荷, 因此需要具有良好的自润滑性能。传统生产多选用巴氏合金, 但其高温承载能力较差, 随着摩擦磨损服役环境温度升高, 易出现严重的黏着磨损引发烧瓦^[4]。铜基、锌基和锡基轴承合金的承载能力与疲劳性能较佳, 但其表面顺应性、嵌藏性与润滑性能较差, 易损伤轴承, 使用时须在表面增设铅锡二元或三元合金镀层, 制造成本随之上升^[5-7]。铝基轴承合金是近年发展起来的一种优良减摩材料, 具有质轻、比强度高、抗疲劳性能好、导热性好及优异的耐蚀性能、耐摩擦磨损性能^[8-9]。

本文以GE公司H65型挡油环部件为研究对象, 选用B12G32A铝基轴承合金采用低压铸造方法浇注成形了106T4511内挡油环铸件与106T4515外挡油环铸件, 并对其显微组织与力学性能进行了研究分析, 本体试样进行了摩擦-磨损试验, 结果可为铝基轴承合金的工业化应用提供工艺指导和数据参考。

1 材料制备与表征

表1所示为B12G32A合金材料的化学成分。合金熔炼采用300 kg电阻熔化炉, 首先加入高纯Al锭, 加热至800℃加入纯Cu铸锭、Al-10Ni与Al-4Fe中间合金; 降温至740~750℃加入Al-5Ti-B中间合金, 采用C₂Cl₆与TiO₂精炼除气15 min, 之后降温加入纯Sn铸锭, 静置12 min后降温至(705±3)℃完成挡油环铸件的低压浇注。表2所示

为106T4511内挡油环与106T4515外挡油环的低压浇注工艺参数。铸型材料选择为70/140目的硅砂，粘结剂选择为5140与5132型酚醛树脂，添加量占硅砂总重分别为0.8%与1.0%。时效热处理在SLH101型数显电热鼓风干燥箱时效炉内完成（炉温精度控制为 $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，最高温度为 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）。图1所示分别为106T4511内挡油环铸件与106T4515外挡油环铸件的结构示意图。

试验截取本体试样并加工成标准力学性能拉伸试样，见图2。并依次采用400#、800#、1 500#砂纸对试样表面进行打磨抛光，以消除试样表面机加磨痕对力学性能测试结果的影响，并以3根力学试样作为一个试验测试组，取其平均值作为力学性能测试结果。力学性能试验在WDW-100KN试验机上完成，夹头移动速度为 2 mm/min 。微观组织观察在AX10ZIESS光学显微镜上进行，金相腐蚀剂选用低浓度混合酸，体积比(HF):(HCl):(HNO₃):(H₂O)=2:3:5:195，晶间腐蚀剂为1 L H₂O、57 g NaCl、10 mL H₂O₂。

2 低压浇注凝固成形工艺设计

图3所示为106T4511内挡油环低压浇注凝固成形工艺设计示意图。图1a所示106T4511内挡油环内径为548 mm，外径为766 mm，高度为264 mm，最大壁厚为24 mm，最小壁厚为8 mm。选用如图3a所示的低压

浇注工艺，直浇道直径为80 mm，高度为148 mm；环状横浇道内径为428 mm，外径为862 mm，高度为32 mm；低压浇注内浇道与铸件相连截面尺寸为 $62\text{ mm}\times 14\text{ mm}$ ，与横浇道相连截面尺寸为 $98\text{ mm}\times 38\text{ mm}$ ，内浇道高度为82 mm；与环状横浇道相连的缝隙浇道直径为72 mm，缝隙浇道上内浇道截面尺寸为 $32\text{ mm}\times 12\text{ mm}$ 。分别在106T4511内挡油环铸件上端与边缘处增设厚度为30 mm的45钢激冷冷铁，以实现铸件自上而下与自外向内的顺序凝固温度场。图3b所示为内挡油环铸件低压浇注砂芯装配示意图，由三段不同的砂芯组装而成。型芯装配示意图见图3c，将组装好的砂芯放置于第二砂箱中，之后盖上第三箱与盖箱，完成106T4511内挡油环铸件砂箱的组装。

图4所示为106T4515外挡油环低压浇注凝固成形工艺设计示意图。图1b所示106T4515外挡油环内径为432 mm，外径为874 mm，高度为282 mm，最大壁厚为28 mm，最小壁厚为10 mm。选用如图4a所示的低压浇注工艺，直浇道直径为86 mm，高度为132 mm；

表1 B12G32A合金化学成分

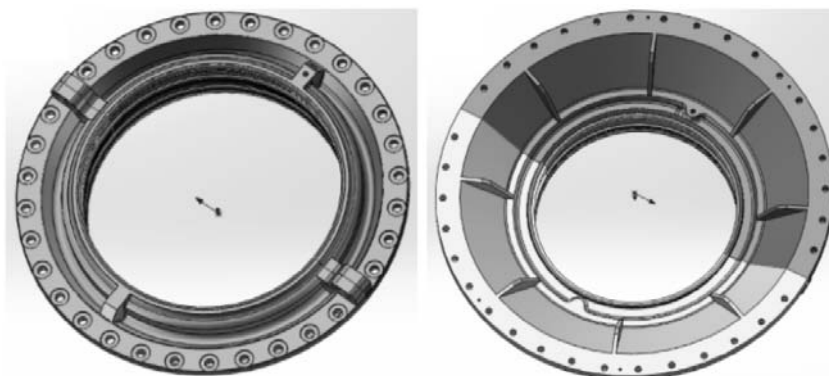
Table 1 Chemical compositions of B12G32A alloy $w_B/\%$

Cu	Fe	Mg	Mn	Ni	Si	Sn	Ti	Al
0.7~1.3	<0.7	<0.1	<0.1	0.7~1.3	<0.7	5.5~7.0	<0.2	余量

表2 挡油环部件低压浇注工艺参数

Table 2 Low-pressure casting process parameters of oil deflector parts

名称	升液压力/kPa	升液速度/($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	充型压力/kPa	充型速度/($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	补缩压力/kPa	保压时间/s
106T4511	40	40	45	45	50	720
106T4515	45	45	50	55	60	850



(a) 内挡油环

(b) 外挡油环

图1 挡油环结构示意图

Fig. 1 Structure schematic of oil deflector parts

环状横浇道内径为384 mm，外径为948 mm，高度为30 mm；低压浇注内浇道与铸件相连截面尺寸为58 mm × 15 mm，与横浇道相连截面尺寸为94 mm × 36 mm，内浇道高度为76 mm；与环状横浇道相连的缝隙浇道直径为68 mm，缝隙浇道上内浇道截面尺寸为28 mm × 14 mm。考虑到106T4515外挡油环铸件上表面面积较大，施加激冷冷铁易产生偏析与热裂缺陷，因此铸件上端与边缘处不再增设冷铁，整体通过树脂砂型进行激冷凝固。图4b所示为外挡油环铸件低压浇注砂芯装配示意图，由两段不同的砂芯组装而成。型芯装配示意图见图4c，将组装好的砂芯放置于第二砂箱中，之后盖上第三箱与盖箱，完成106T4515外挡油环铸件砂箱的组装。

3 微观组织分析

如图1所示，106T4511内挡油环与106T4515外挡油环内腔锯齿结构较为复杂。为了提高部件机械加工的尺寸精度，需要对内挡油环和外挡油环部件进行时效消除应力处理；时效保温温度为140 °C，时效保温时间为2.5 h。图5所示为B12G32A合金不同状态下的金相组织。Al-Sn互不溶体系的混合热为+19 kJ/mol，在 (892 ± 20) K下Sn在Al中的最大固溶度（原子分数）

为0.026%。Al-Sn系合金结晶时，首先析出初生 α -Al基体，在达到共晶温度（502 K）时，Sn呈片状或球状在Al的晶界上析出；当Sn含量较高时（>5%）时，由于Al和低熔点Al-Sn共晶体之间存在界面张力，Sn形成了网状组织，并将Al晶粒焊在一起。B12G32A合金中的少量组元以 Al_2Cu 、 Al_3Ni 、 Ni_2Al 、 Al_3Ti 、初晶Si等硬脆金属间化合物相存在，分布于初生 α -Al基体和低熔点的Al-Sn共晶体中，见图5b中箭头位置所示。随着时效保温过程的持续进行，初生Sn相与Al-Sn共晶体持续受热，部分溶入初生 α -Al基体内部；沿晶界分布的Sn相受热后，网状脉络更加致密，均匀包裹在晶界处，见图5d中箭头位置所示，在高速运转过程中Sn相不断平铺至摩擦界面，起到良好的自润滑效果。

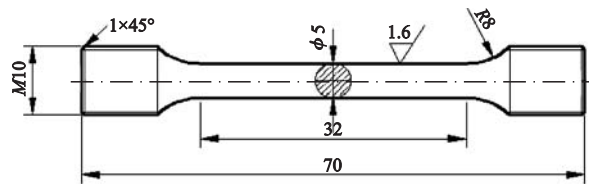


图2 力学性能拉伸试样示意图
Fig. 2 Schematic of tensile specimen

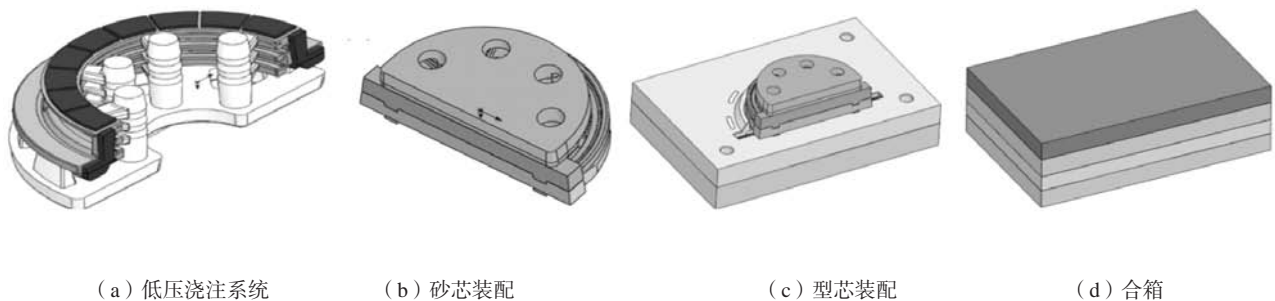


图3 内挡油环低压浇注凝固成形工艺设计示意图
Fig. 3 Low pressure casting process schematic of inside oil deflector part

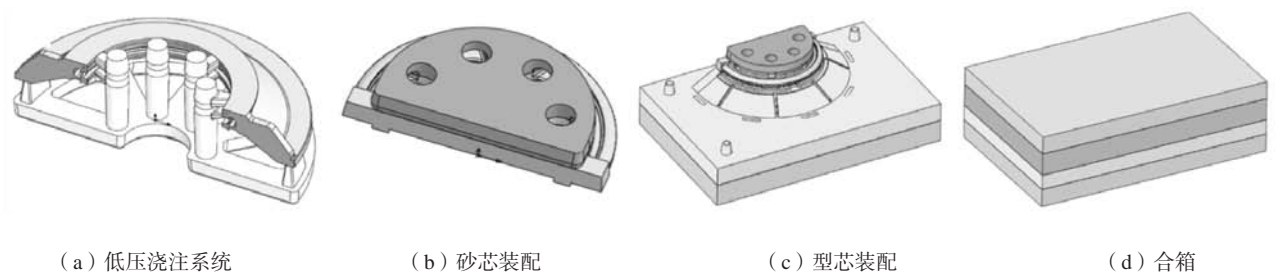


图4 外挡油环低压浇注凝固成形工艺设计示意图
Fig. 4 Low pressure casting process schematic of outside oil deflector part

4 力学性能测试

图6所示为106T4511内挡油环与106T4515外挡油环本体试样在铸态与时效态力学性能的测试结果。由图6可知：B12G32A合金铸态平均抗拉强度、屈服强度与伸长率分别为132.6 MPa、112.8 MPa与14.5%，满足了技术指标要求（抗拉强度不小于110 MPa，伸长率大于5%）。经低温时效热处理后，本体试样平均抗拉强度、屈服强度与伸长率分别为134.0 MPa、115.3 MPa与15.3%。与铸态试样相比，性能基本接近。

图7所示为本研究工作制备的106T4511内挡油环与106T4515外挡油环的产品实物照片，且经表面着色探伤检验，铸件表面无裂纹、气孔与疏松冶金缺陷。试验截取106T4511内挡油环时效态本体试样，进行了

摩擦-磨损试验测试。摩擦试验在MFT-R4000高速往复摩擦磨损试验仪上进行，摩擦方式为球-盘往复式，摩擦副为B12G32A合金时效态，试验载荷为15 N，试验频率为5 Hz，摩擦行程为10 mm，时间为30 min。摩擦环境为油润滑环境，试验用润滑油为液体石蜡。图8所示为摩擦-磨损试验结果。由图8a所示EDS分析结果可知：摩擦-磨损试验过程在摩擦副表面粘附的片状相为B12G32A合金摩擦副残留物。在往复摩擦-磨损试验过程中，摩擦副表面呈网络状分布的初晶Sn与Al-Sn共晶体在摩擦高温下，屈服强度较低；随着试验载荷的增加，表面微凸体的变形和断裂在剪应力的作用下先后出现，Sn相被挤压成片状，发生粘着转移，均匀覆盖在摩擦副表面，起到了良好的自润滑保护作用，见图8b所示。

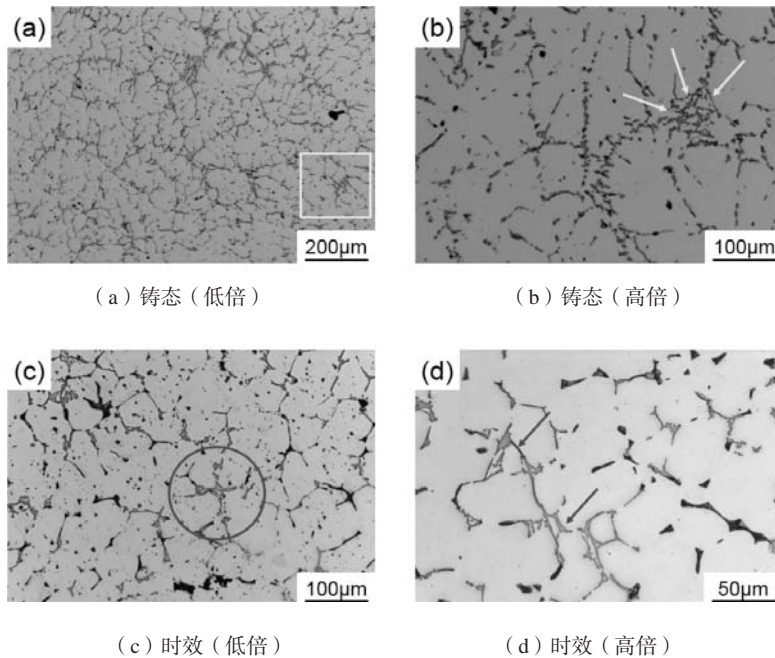


图5 B12G32A合金不同状态金相组织

Fig. 5 Microstructures of low pressure cast B12G32A alloy specimens in as cast and heat treatment conditions

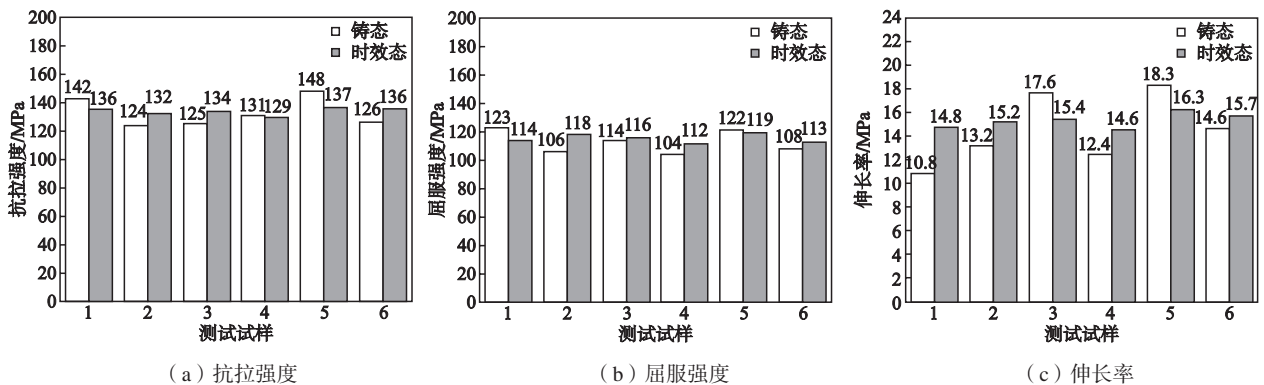


图6 力学性能测试结果

Fig. 6 Mechanical properties of low pressure cast B12G32A alloy specimens in as cast and heat treatment conditions

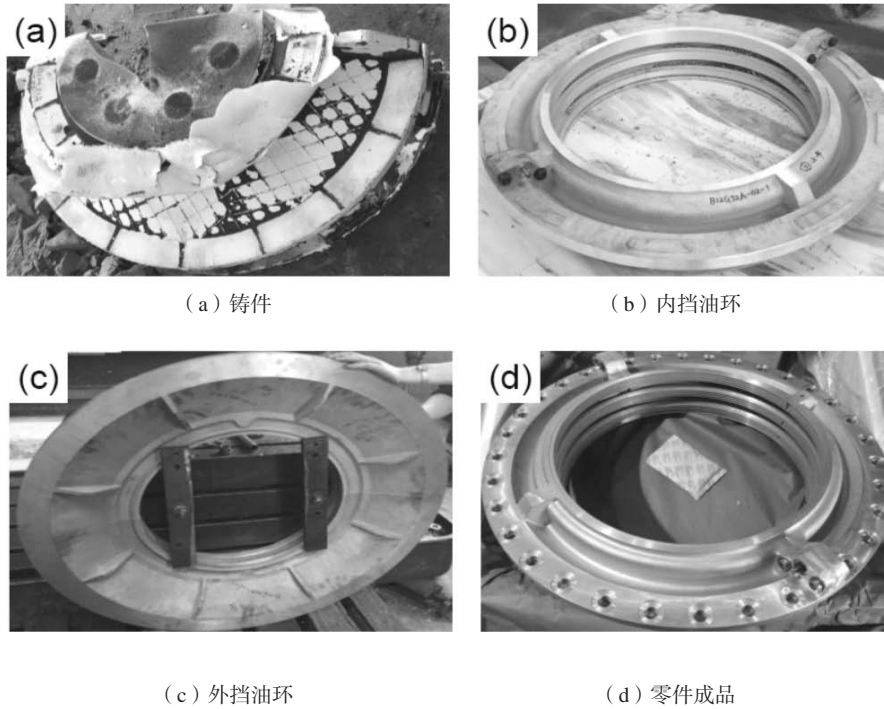
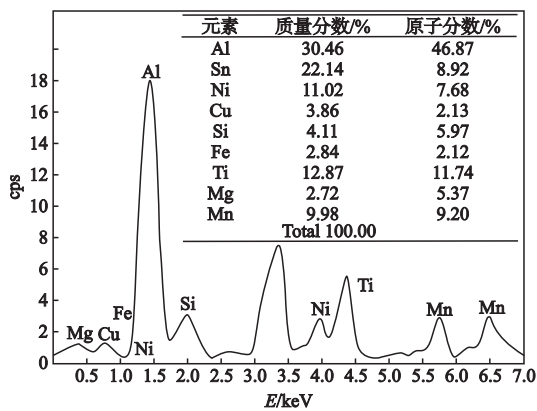
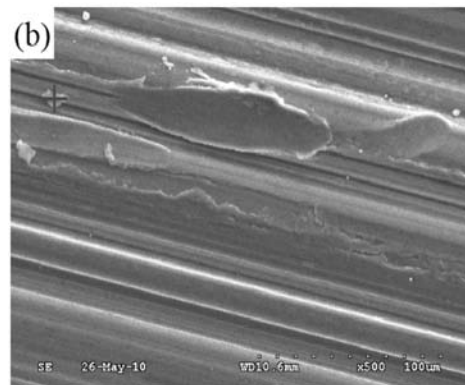


图7 产品实物图片

Fig. 7 The photograph of products



(a) EDS分析



(b) 磨损表面SEM图像

图8 EDS分析和摩擦-磨损表面SEM图像

Fig. 8 EDS analysis and SEM image of friction-wear surface

5 结论

(1) 设计了B12G32A内挡油环与外挡油环低压铸造工艺,并浇注了铸件,通过在铸件顶部与边缘处布置冷铁,实现了铸件自上而下与自外向内的顺序凝固。凝固组织中低熔点的Al-Sn共晶体受界面张力作用,形成了网状包络组织,将初生 α -Al基体焊合在一起。

(2) 挡油环部件铸态本体试样平均抗拉强度、屈服强度与伸长率分别为132.6 MPa、112.8 MPa与14.5%,经140℃时效保温2.5h后,本体试样平均抗拉强度、屈服强度与伸长率分别为134.0 MPa、115.3 MPa与15.3%。与铸态组织相比,时效后初晶Sn相与Al-Sn共晶体的分布更为均匀。

(3) 在摩擦-磨损试验中,随着试验载荷的增加,表面微凸体的变形和断裂在剪应力的作用下先后出现,Sn相被挤压成片状,发生粘着转移,均匀覆盖在摩擦副表面,起到了良好的自润滑保护作用。

参考文献:

- [1] 范学领, 李定骏, 吕伯文, 等. 国之重器, 十载砥砺-重型燃气轮机制造基础研究进展 [J]. 中国基础科学, 2018 (2): 32-40.
- [2] 高青风, 张晓磊, 李威, 等. 燃气轮机双流路燃油喷嘴结构设计及性能分析 [J]. 汽轮机技术, 2018, 60 (3): 165-168.
- [3] 任敬琦, 曹越, 桑懿谦, 等. H级重型燃气轮机建模与动态仿真 [J]. 动力工程学报, 2018, 38 (2): 98-104.
- [4] 覃文杰, 王琨. 大型汽轮机轴瓦巴氏合金离心浇注工艺研究 [J]. 大型铸锻件, 2018 (4): 5-7.
- [5] 张冰毅, 王智民, 张冀粤. 锌基轴承合金性能的研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2001 (6): 18-19.
- [6] 苏有, 云雪峰, 郝东永. 锡基轴承合金双金属浇注工艺研究 [C]. 2013中国铸造活动周论文集, 2013, 1-4.
- [7] 曾刚, 曾效舒, 黄秋玉, 等. 钟罩压块铸造法制备CNTs/ZChPbSb15-5轴承合金复合材料 [J]. 材料热处理技术, 2011, 40 (20): 96-98.
- [8] 曾美琴, 鲁忠臣, 陈进添, 等. 铝基滑动轴承合金的研究进展 [J]. 机械工程材料, 2018, 42 (6): 7-14.
- [9] 孙大仁, 杨晓红, 张明吉, 等. 铸造铝铅滑动轴承合金的制备及其显微组织 [J]. 特种铸造及有色合金, 1998 (5): 1-5.

Solidification Forming Process of Low Pressure Cast B12G32A Aluminum-Based Oil Deflector Parts

FAN Zhen-zhong^{1,2}, MENG Li-hong³, JIANG Guo-qing³, CAO Lan³

(1.Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 2.Beijing Advanced Engineering Technology and Application Research Center of Aluminum Materials, Beijing 100095, China; 3. GE Energy Hangzhou Co., Ltd., Hangzhou 311231, Zhejiang, China)

Abstract:

In the present study, B12G32A aluminum-based bearing alloy was used as an oil deflector material. A low pressure filling casting process was designed to realize the solidification sequence from the top to the bottom and from outside to inside of the B12G32A oil deflector castings, and the microstructure was observed and mechanical properties were measured for the samples from casting itself. The results reveals that the primary α -Al matrix with network morphology of is surrounded by Al-Sn eutectic phases due to the interfacial tension. after aging for 2.5 h at 140 °C , the average tensile strength, yield strength and elongation are 134.0 MPa, 115.3 MPa and 15.3% respectively. During the friction-wear process, the low-melting Sn phase is continuously extruded into sheet shape, and transfers to the surface of the friction pair with uniform distribution, leading to a good self-lubricating effect.

Key words:

B12G32A alloy; solidification process; microstructure; mechanical properties; low pressure casting
