

低压铸造铝合金电机端盖的研制

吴忠斌¹, 夏小江¹, 胡鸿斌¹, 尚方²

(1. 浙江省机电设计研究院有限公司, 浙江杭州 310000;
2. 中车戚墅堰机车车辆工艺研究所有限公司, 江苏常州 213011)

摘要: 研究双层铝合金端盖的成形工艺, 从铸件多薄筋、针孔度要求高、易缩松等质量难点出发, 介绍铸件低压铸造浇注系统设计思路、层流压力曲线的设计方法及惰性气体除气法针孔缺陷的控制原理和方法, 并通过铸造模拟软件仿真分析工艺的合理性。基于装配过盈量大, 介绍温差法装配参数的设计方法, 按照预设参数生产试制, 并通过渗透探伤、射线探伤、针孔度检测、本体解剖等充分验证, 满足产品技术要求。

关键词: 铝合金铸件; 低压铸造; 温差法装配

近年来, 随着轨道交通行业的快速发展、日益严苛的节能减排和环保要求, 对产品轻量化水平的发展越来越迫切, 高端铝合金零部件的开发和应用得到广泛的关注。某型号轨道交通用电机端盖为双层装配结构, 主体为铝合金ZL101A材质铸件, 内圆装配42CrMo材质钢套, 这种结构既可以减轻产品重量, 又能保证内孔轴承安装处的强度和耐磨性。铝合金铸件质量要求整体射线探伤, 需满足ASTM E155二级, 指定位置解剖后断口无缺陷; 全表面渗透探伤, 线性缺陷不允许存在; 本体力学性能需满足 $R_m \geq 230$ MPa, $R_{p0.2} \geq 190$ MPa, $A \geq 2\%$, $HBS \geq 75$; 加工面单个针孔直径不超过1.0 mm。电机端盖作为电机上的关键零部件, 结构复杂, 内部质量要求高, 且周向发散多条薄壁散热筋, 而底部和内圆法兰厚大, 铸件壁厚差距大, 同时解决厚壁缩松和薄壁充型是铸造过程中的难点。另外, 产品底部厚大法兰部位加工面针孔缺陷超标, 也是必须攻克的问题。

1 工艺设计

1.1 浇注系统设计

铸件轮廓尺寸430 mm × 430 mm × 150 mm, 质量13.9 kg, 产品主体部分壁厚约7 mm, 底部加工面和内圈法兰为厚大热节区, 厚度约30 mm; 周向发散27条散热筋, 高度100 mm, 厚度约4 mm; 产品壁厚不均, 散热筋充型难度大。中间法兰处设有油道, 油道连通顶面与钢套, 油道腔两次弯曲, 两端出口角度呈90°, 砂芯清理困难。产品结构示意如图1所示。该铝合金电机端盖铸造工艺难点在于: ①散热筋数量多壁厚薄, 充型难度大; ②壁厚不均, 法兰和底平面厚大, 凝固时易产生内部缩孔缩松缺陷; ③加工面针孔类缺陷易超标。

低压铸造是一种反重力铸造方法, 自下而上充型, 自上而下凝固。相对于重力铸造, 低压铸造在压力状态下充型和凝固, 充型平稳, 可增加金属液的充型能力, 减少缩孔缩松缺陷^[1]。因电机端盖薄散热筋数量多、壁厚差异大、内部质量要求高等特点, 综合考虑订单量、成本和生产条件, 决定采用自硬化呋喃树脂砂型低压铸造工艺, 油道腔采用溃散性较好的覆膜砂坭芯成形。浇注工艺设计时, 将产品厚大底平面朝下, 薄壁散热筋面朝上, 底平面和内圈法兰加工面上布置内浇道,

作者简介:

吴忠斌(1990-), 男, 本科, 主要从事铸造工艺、装备设计及铸造新材料研究等工作。E-mail: wuzhongbin@126.com

中图分类号: TG249.2;

TG146.2

文献标识码: B

文章编号: 1001-4977(2024)

05-0693-06

收稿日期:

2023-07-18 收到初稿,
2023-10-12 收到修订稿。

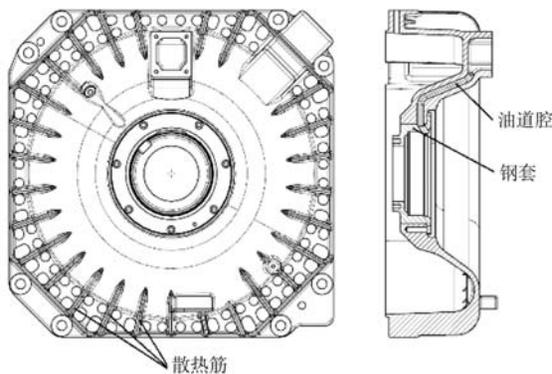


图1 电机端盖结构示意图

Fig. 1 The structure of bearing shield

$\sum F_{直浇道} : \sum F_{横浇道} : \sum F_{内浇道} = 1 : 2.4 : 2$ 。铝合金液从内浇道引入，自下而上由厚壁逐渐流入到薄壁散热筋。内浇道之间厚大平面和法兰顶面无法直接补缩到的区域采用冷铁激冷，增加内浇道的补缩距离。凝固时，薄壁筋作为凝固末端区优先凝固，厚大法兰和底平面部位最后凝固，且正对内浇道可直接压力补缩。产品无冒口，内浇道均设置在加工面，残余内浇道可在加工工序去除。产品铸造工艺示意图如图2所示。

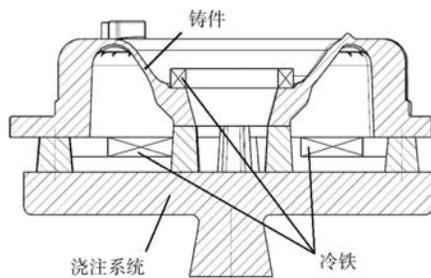


图2 铸造工艺示意图

Fig. 2 Sketch map of casting process

1.2 压力曲线设计

根据帕斯卡压力计算公式(1)计算浇注过程各阶段的充型压力。

$$p = h\rho\mu \times 10^{-4} \quad (1)$$

式中： p 为充型压力，MPa； h 为铝合金液面上升的高度，m； ρ 为铝合金液的密度， kg/m^3 ； μ 为阻力因数，取1.1~1.5。

由于铝合金液体存在粘滞性，在充型过程中存在两种流动形态。液体质点作有条不紊的运动，彼此不相混掺的形态称为层流。液体质点作不规则运动、互相混掺、轨迹曲折混乱的形态叫做紊流（湍流、乱流）。以雷诺数 Re 来表征铝合金液的充型流态。

$$Re = \rho vd/\mu \quad (2)$$

式中： ρ 为铝合金液的密度 $2.4 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ， v 为充型过程中的流速 m/s ， d 为铝液流经的当量直径 m ， μ 为铝液动力粘度系数，取 1.573×10^{-3} 。

当 $Re \leq 2000$ 时，为层流状态；当 $Re > 4000$ 时，为紊流状态；当 Re 介于2000和4000之间时为不稳定状态^[2]。根据公式(2)可得， v 值越大则 Re 越大，铝液更趋近于紊流状态。因产品散热筋数量多壁厚薄，需要较大的充型速度才能充满型腔；而充型过程又要保证为层流状态，使层与层之间不相互穿插，且液面前端的氧化膜不被冲破造成卷气和夹渣。因此雷诺数 Re 取层流状态的最大值2000，根据公式(2)计算得到充型速度 v 值。

再根据公式(3)计算各阶段的充型时间。

$$v = h/t \quad (3)$$

式中： v 为铝液的充型速度， m/s ； h 为铝液在各阶段的上升高度， m ； t 为铝液的上升时间， s 。

最终确定的浇注曲线参数见表1。浇注时采用无缝钢管升液管，表面浸涂料处理，浇注前烘烤升液管和保温套至 $400 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上，浇注温度 $705 \sim 720 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

表1 浇注参数

Table 1 Pouring parameters

时间/s	0	15	38	40	43	440	443
压力/ $\times 10^{-4}$ MPa	0	245	315	325	700	700	0

1.3 工艺仿真分析

将产品工艺模型转化为STL文件导入到铸造模拟软件，进行充型和凝固过程模拟分析。预处理网格划分数量500万，材料选择AlSi₇Mg，补缩效率设置为40%，铝液浇注温度 $710 \text{ }^\circ\text{C}$ ，砂型和冷铁初始温度 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ，设置铸件-砂型传热系数为C800，铸件-冷铁传热系数为C3500，压力曲线输入浇注参数见表1。充型过程中的铝液的流态及温度场见图3所示，整个充型过程中，金属液流动平稳，未出现紊流、飞溅和打旋现象。凝固过程温度场如图4所示，四周薄壁加强筋和顶部优先凝固，其次是底平面和法兰部位，浇口部位最后凝固，型腔无孤立液相区。根据Porosity判据，产品凝固完成未见5%以上的缩松缺陷，仅在局部位置存在轻微点状缩松。基于以上分析，说明浇注系统及压力曲线设计合理。

1.4 装配工艺设计

根据图纸要求，钢套与铸件需过盈配合，铝合金电机端盖外测法兰精加工尺寸为 $\Phi 377 \text{ mm}$ ，公差m6级，即尺寸公差为 $\Phi 377 (+0.021 \sim +0.057) \text{ mm}$ ，公差

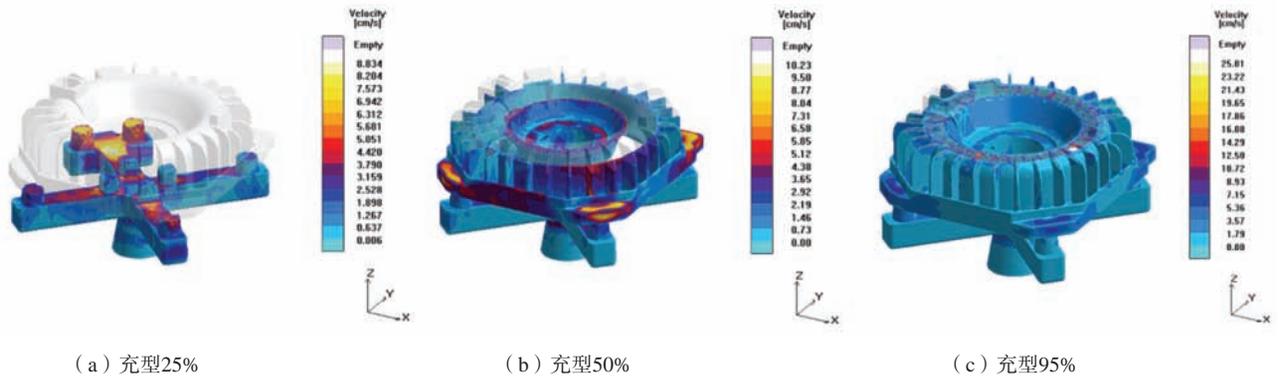


图3 充型流场分布
Fig. 3 The distribution of flowing field

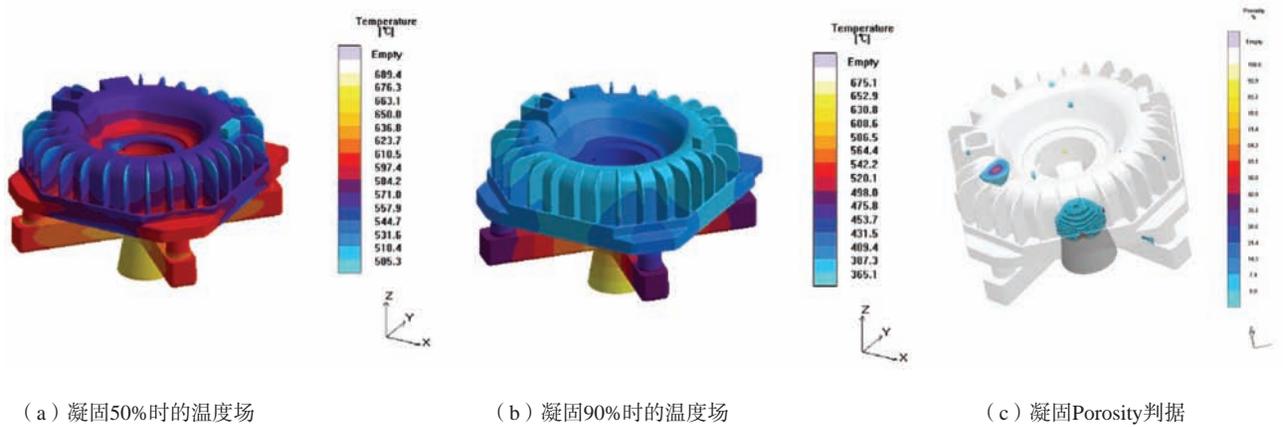


图4 凝固温度场及判据
Fig. 4 The distribution of solidification temperature field & solidification criteria

较小，若先精加工此法兰再装配，因铝合金强度较低，过盈装配必然造成法兰直径涨大，易导致法兰变形尺寸超差。为避免钢套装配过程对法兰尺寸造成影响，因此先进行钢套装配，然后精加工法兰。装配配合面尺寸 $\Phi 131 \frac{H7}{u6}$ ，根据ISO 286-2查得，电机端盖内孔径尺寸为 $\Phi 131 (0 \sim +0.04)$ mm，钢套外径尺寸为 $\Phi 131 (+0.17 \sim +0.195)$ mm，最大配合过盈量为0.195 mm。产品过盈量较大，且为加工面装配，因此考虑采用温差法进行装配^[4]。因产品尺寸不大，重量较轻，且配合表面粗糙度为Ra1.6左右，为达到二者顺利装配，根据笔者所在公司的装配经验，此种大小规格的装配，装配间隙满足单边0.15 mm以上即可。

根据现有生产条件，计划采用同时采用液氮冷冻钢套和加热铝电机端盖的方式控制装配尺寸。具体介质参数见表2。

根据线膨胀公式(4)计算零件在温度升降时的膨胀/收缩量。

$$\Delta L = L \times \alpha \times \Delta t \quad (4)$$

表2 介质参数
Table 2 The parameters of mediums

零件	介质	温度/℃
钢套	液氮	-196
轴承盖	水	100

查得钢套的线膨胀系数按照 $11.7 \times 10^{-6}/\text{℃}$ ，铝合金电机端盖线膨胀系数按照 $23 \times 10^{-6}/\text{℃}$ ，室温按照20 ℃。计算得到液氮冷却时钢套外径的收缩量为0.33 mm，电机端盖加热时内孔热膨胀量为0.24 mm，装配间隙为0.19 mm左右。

2 产品试制

2.1 造型及熔炼

采用上述方案进行生产试制，主体部分采用70~140目自硬化呋喃树脂砂手工造型，法兰面环形冷铁背面安装挂砂钩，以防止冷铁偏移，油道芯采用50~100目覆膜砂热芯盒制芯。坭芯拼接完成后，使用

醇基涂料流涂2遍，点火燃烧后合箱。

铝合金加工面针孔缺陷，一直是大气环境下浇注铝合金铸件难题。由于铝熔体具有吸氢特性，在熔炼和铸造生产过程中易与空气中的水汽反应，使熔体氢含量增加。氢在液态铝中的溶解度约为其在固态铝中的19.1倍^[1]。铝合金在结晶凝固过程中，氢在固液相界面存在过饱和现象，氢有较大的析出动力和趋势，氢由氢原子逐渐形成氢气泡，向界面移动和析出，过饱和和溶解度和铝液加压压力为析出提供动力；此时铝液表面有一层致密的Al₂O₃膜，其表面张力是氢气泡析出的阻力。随着氢气泡析出，过饱和度逐渐减小，而低压铸造的保压典型压力值为0.07 MPa，析出动力逐渐减小；当动力不足以克服铝液中的氢析出阻力时，溶解在铝合金中的氢气即使形成了气泡，也不能析出相界面，而只能以分子状态气泡的形式悬浮在铝液中，在铝液凝固时产生针孔^[2]。因此，控制浇注前铝合金液中的氢含量对于解决针孔缺陷至关重要。

采用惰性气体吸附法是目前业内使用较多的除气方法，即在铝合金熔体中通入用既不溶解于液态铝合金、又不与铝合金熔体和溶解的氢发生化学反应的惰性气体，如氩气和氮气，将氢吸附并排出。除气时，惰性气体以小气泡的形式通入铝液中，惰性气体进入

铝合金液体的最初阶段，其气泡中的氢分压为零，惰性气体气泡与铝合金液体的界面上有氢压力差，使金属中的氢不断地扩散到惰性气体的气泡中去，直到压差为零，达到平衡为止。而惰性气体的密度远小于铝合金液的密度，气泡会不断浮出，这时氢就会随着惰性气体气泡一同浮出铝合金液面。检测铝合金液的除气效果，常采用当量密度测量法，除气效果越好，氢含量越低，铝合金密度越高。

本产品生产过程中，采用连续式燃气化铝炉进行熔炼，原材料选用GB/T 8733中的356Z.2铝合金锭，添加不超过30%的回炉料，相关元素以中间合金形式加入，熔炼控制最终成分范围见表3。铝液熔化后转入浇注炉中除气和精炼，使用氩气吸附精炼法，石墨转子旋转吹除气进行精炼和除气，除气时通高纯氩气（纯度99.99%），并添加Al-10Sr变质剂和精炼剂，Sr加入量为0.015%~0.04%，除气转子转速500~800 rpm，氩气压力0.2~0.4 MPa，铝液温度730~750 °C，除气时间25~30 min。浇注前从浇注炉中取约100 g铝液倒入制样小坩锅中，迅速转移至真空仪抽真空处理5 min，冷却后利用密度天平检测试样的密度，控制铝液密度≥2.63 g/cm³后浇注。

表3 化学成分
Table 3 The elemental composition

Si	Fe	Cu	Mg	Mn	Ti	Al	w _B /%
6.5~7.5	≤0.15	0.05	0.25~0.45	≤0.1	0.08~0.20	余量	

2.2 后处理

浇注完成6 h后开箱，使用钝头风镐清理砂型，等离子切割机去除浇注系统，内浇道留残高3~6 mm。使用箱式电阻炉进行热处理，热处理制度按照GB/T 1173推荐的T6热处理工艺执行，具体热处理参数见表4。热

处理过程中铸件散热筋面朝上摆放，制作专用工装隔开相邻铸件，铸件不叠压，防止散热筋挤压变形和磕伤。清理、精整和打磨完成后，铸件悬挂抛丸处理，使用丸粒直径0.8 mm不锈钢丸，抛丸时间15 min。

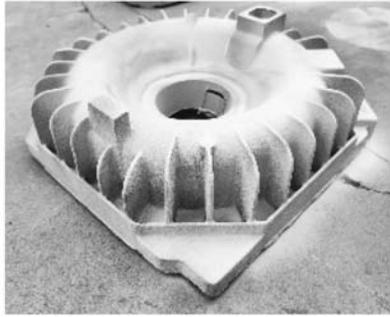
表4 热处理工艺参数
Table 4 The parameters of heat treatment

材质	固溶			时效		
	温度/°C	时间/h	冷却介质水/°C	温度/°C	时间/h	冷却介质
ZL101A	535 ± 5	6~8	60~100	室温	≥8	空气
				再180 ± 5	3~8	空气

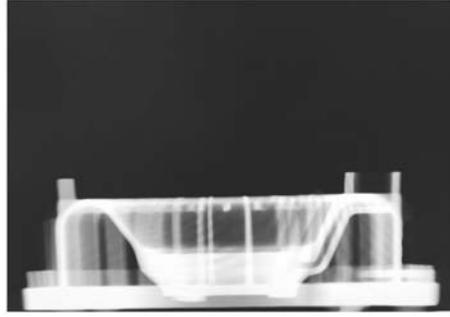
3 生产验证

对电机端盖铸件进行外观检查，铸件散热筋饱满充足、表面一致性较好、油道贯通无杂物。铸件全表

面按照EN 1371-1进行着色渗透探伤检验，未见线性指示缺陷，非线性缺陷SP 2级，装配面无线性显示；对电机端盖按照ASTM E94进行射线探伤检验，评定结果为ASTM E155二级，渗透和射线探伤结果见图5所示。内



(a) 渗透探伤



(b) 射线探伤

图5 无损探伤结果

Fig. 5 The result of non-destructive testing

圆加工后，液氮冷却钢套，同步采用开水加热电机端盖，装配过程顺利可靠。精加工后，对加工面针孔缺陷进行检验，经测量单个针孔最大直径约0.6 mm。产品满足了规定的技术要求。

按照图纸要求对铸件进行指定位置断面解剖和本体取样。解剖断面未发现肉眼可见的宏观缺陷，铸件组织致密，油道通顺光滑，无粘砂，本体解剖断面见图6。铸件按照表4热处理参数进行T6热处理后，对本体底部法兰面厚大部位（厚度30 mm）进行本体取样，

作力学性能检验，拉伸试验检验按照ISO 6892—1执行，硬度试验按照ISO 6506-1执行，检验结果见表5。试验结果合格。

表5 本体解剖力学性能

Table 5 Mechanical properties of test piece cut from casting

试样	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A /%	HBS
1#	260	213	4.5	92
2#	256	220	5.0	90

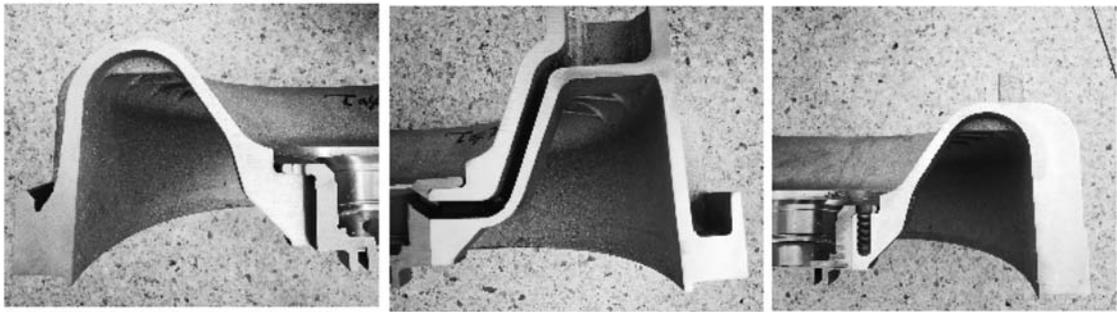


图6 本体解剖断面图

Fig. 6 The section map of casting

4 结论

(1) 低压铸造生产高质量要求薄壁铝合金铸件具有充分的优势，通过合理设计浇注系统和压力曲线，既可保证薄壁充型完整，又能确保产品内部质量。

(2) 采用惰性气体吸附法精炼，减少浇注前金属液氢含量，对控制铝合金的针孔缺陷有明显的改善作用。

参考文献:

- [1] 叶凤柏, 郭李胜, 周亚军, 等. 低压、差压和调压铸造工艺原理及其优势 [J]. 铸造工程, 2013 (4): 19-21.
- [2] 中国机械工程学会铸造分会. 铸造手册: 铸造工艺 [M]. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [3] SIG WORTH G K. A scientific basis for degassing aluminum [J]. AFS Transaction, 1988, 95: 73-78.
- [4] 王连宏, 张雪冬, 尹艳亮, 等. 基于温差法的连杆衬套装配工艺研究与实践 [J]. 新技术新工艺, 2016 (11): 83-84.

Development of Low Pressure Casting Aluminum Alloy Bearing Shield

WU Zhong-bin¹, XIA Xiao-jiang¹, HU Hong-bin¹, SHANG Fang²

(1. Zhejiang Institute of Mechanical & Electrical Engineering Co., Ltd., Hangzhou 310000, Zhejiang, China; 2. CRRC Qishuyan Institute Co., Ltd., Changzhou 213011, Jiangsu, China)

Abstract:

The forming process of double layer bearing shield was researched. Starting from the quality difficulties such as multiple thin ribs, high requirements for pinhole degree, and easy shrinkage in castings, this paper introduces the design concept of low-pressure casting gating system, the design method of laminar pressure curve, and the control principle and method of needle pinhole defects using inert gas degassing method. The rationality of the prediction process is analyzed through casting simulation software simulation. Based on the large assembly interference, this paper introduces the design method of temperature difference method assembly parameters. Production trial production is carried out according to preset parameters, and it is fully verified through penetration testing, radiographic testing, pinhole degree testing, body dissection, etc., to meet the technical requirements of the product.

Key words:

aluminum casting; low pressure casting; temperature difference assembly
