

重力倾转铸造工艺在铝合金底盘结构件上的应用

张云峰, 丛培军, 张 鹏, 吴 贺, 赵勇箭, 赵建锋, 鲁晓帆

(一汽铸造有限公司, 吉林长春 130011)

摘要: 介绍了采用重力倾转铸造工艺开发生产的铝合金底盘结构件。该底盘结构件为某欧系豪华品牌底盘副车架支架, 材质选用ALSi7Mg0.3, 重量约3 kg, 尺寸范围330 mm × 260 mm × 250 mm, 最小壁厚为5 mm, 最大壁厚达36 mm, 产品整体结构呈现“L”形状。通过采用重力倾转铸造工艺、加氢精炼处理、T6热处理等工艺, 实现了产品性能满足屈服强度 $R_{p0.2} \geq 190$ MPa, 抗拉强度 $R_m \geq 230$ MPa, 伸长率 $A_{50\text{mm}} \geq 3\%$, 硬度HBW80~110的要求。

关键词: 底盘结构件; 重力倾转铸造; T6热处理; 加氢处理

随着汽车行业对轻量化的需求越来越大, 底盘结构件材质逐步由传统黑色金属转为有色金属, 并大量应用于转向节、车轮支架、控制臂、副车架等产品。其中铝合金相比于传统钢铁材料, 具有密度小、质量轻、铸造加工性能优良、耐腐蚀性能好、易回收再利用、在发生碰撞时会比钢铁材料吸收更多的碰撞能量等优点, 从而大量应用在底盘结构件上^[1]。底盘结构件主要起到受力和承载作用, 并与多个零部件进行连接装配, 属于汽车安全件。这类产品通常呈现出结构复杂、成形困难、力学性能要求严等特点, 对制造工艺要求很高。当前行业多采用低压铸造、差压铸造、挤压铸造生产底盘结构件。本产品通过采用重力倾转铸造工艺, 附加特殊的二次精炼处理, 以满足副车架支架产品性能, 达到目标成品率, 实现稳定批量生产的要求。

1 产品介绍及性能指标

本底盘结构件为不完全对称的左右件, 是某欧系豪华品牌底盘副车架支架产品, 属于安全件。产品重量约3 kg/件, 尺寸规格330 mm × 260 mm × 250 mm, 最小壁厚为5 mm, 最大壁厚达36 mm, 产品整体呈现四周厚大、中心薄壁的特殊结构。通过采用重力倾转铸造工艺开发, 成品率可达90%以上, 全年实现30万件生产能力。副车架支架实物如图1所示。

副车架支架材质选用ALSi7Mg0.3, 该合金具有流动性好、无热裂倾向、线收缩小、气密性好等优点^[2], 合金成分如表1所示。



图1 副车架支架

Fig. 1 Subframe bracket

作者简介:

张云峰 (1990 -), 男, 本科, 助理工程师, 主要研究方向为有色铸造工艺技术研发。电话: 13620784687, E-mail: zhangyunfeng_ys@faw.com.cn

中图分类号: TG249.3

文献标识码: B

文章编号: 1001-4977(2021)08-0980-06

收稿日期:

2020-12-30 收到初稿,
2021-03-01 收到修订稿。

1.1 内部质量要求

副车架支架在生产过程中要求100%进行在线X光探伤,对内部缩松、气孔等缺陷进行判定。产品分为受力区域、功能区域和一般区域,不同区域的判定标准不同。对受力区域、功能区域要求单个缺陷直径 $\leq 1\text{ mm}$,孔隙率 $\leq 5\%$,对一般区域要求单个缺陷直径 $\leq 3\text{ mm}$,孔隙率 $\leq 5\%$ 。

1.2 表面质量要求

副车架支架要进行100%外观检测,通过无损荧光渗透及人工肉眼检查方式对铸件表面的气孔、裂缝、热裂等缺陷进行判定。判定标准也按照受力区域、功能区域和一般区域划分。依据DIN EN 1371标准,对于受力区域,要求检测到的缺陷满足SP1/CP1等级(SP代表非线性的独立缺陷,CP代表非线性的聚集缺陷)。对于功能区域、一般区域,要求检测到的缺陷满足SP2/CP2/AP2等级(AP代表排列成行的缺陷),缺陷最大深度可为0.5 mm,但不允许存在热裂纹、热撕裂和杂质嵌入物。

1.3 力学性能要求

因为副车架支架服役的工况没有转向节、副车架恶劣,所以力学性能与转向节、副车架相比较低。采用铸件本体取样进行检测,取样位置选择在受力区域,具体标准为屈服强度 $R_{p0.2} \geq 190\text{ MPa}$,抗拉强度 $R_m \geq 230\text{ MPa}$,伸长率 $A_{50\text{ mm}} \geq 3\%$,硬度HBW 80~110。

2 工艺设计

副车架支架生产的工艺流程为:铝液熔炼-铝液二次精炼-重力倾转铸造-切边、去除浇道冒口-在线X光探伤-T6热处理-校正-裂纹检测-加工-清洗-装配-打包。

2.1 铝液精炼及加氢处理

铝合金铸件从浇注温度冷却到室温的凝固过程中都会产生收缩倾向,而收缩的方式由合金的成分、气体含量和冷却时的传热条件所决定,凝固过程中铸件内部气体的逸出也常常影响缩孔的产生。在一些铸件生产中,为防止出现局部缩孔缺陷,在铸造前有意向

熔融金属液中引入气体,如汽车排气歧管、车轮等产品已有批量应用。

根据行业研究结果,在补缩条件较差的铝合金铸件中,为了防止较大缩孔的形成,取而代之形成均匀弥散的气孔,可以向合金中引入一定量的氢气,加入量取决于具体合金的成分,并与该合金的液相线温度有关^[1]。氢是液态铝中最易溶解的气体,且溶解度很大,并随着温度的升高而增大。氢在铝液相及固相中的溶解度分别为 $0.65\text{ cm}^3/100\text{ gAl}$ 和 $0.034\text{ cm}^3/100\text{ gAl}$,即氢在液固两相中的溶解度相差19倍,但氢几乎不溶于固态铝^[2]。

在铝合金中加入氢气之所以能够降低缩孔缺陷,从微观角度看,主要原因是当液体合金进入金属型模具开始凝固时,因模具对合金的快速激冷而产生的体收缩,在无补缩通道及合金中含气量特别低时,孤立的液体在收缩产生的流体静张力的主要影响下出现单一生核,并在随后的收缩中形成大孔洞。但如果在凝固的后阶段增加液体静张力或含气量,则生核可以在多处进行,但这取决于核心所占据的核心位置和金属中初始含气量。初始的单一孔洞和经生核而后长大的孔洞相比,具有生产优越性,所以,在合金含气量较低时,铸件中将形成一个较大缩孔。但是,当合金中初始含气量进一步增加时,在收缩和气体析出的共同作用下,多核形成倾向增加,导致大的缩孔减少,取而代之形成大量的小气孔,且在某一临界含气量下,铸件会只出现多核现象,即大缩孔消失,全部为均匀的小气孔^[3]。

本产品采用金属型重力倾转铸造工艺,为了降低铸件缩松倾向,利用上述原理将铝液处理工序分为两步进行。第一步首先采用旋转除气机,使用高纯氩气对铝液进行除气除渣,除气后使用在线密度仪进行密度检测。除气除渣合格后,再次对铝液进行第二步处理,同样使用旋转除气机,但向铝液通入氢氮混合气而实现加氢处理。第二步加氢结束后,使用在线密度仪、测氢仪进行检测,合格后方能进行浇注。生产过程中需保证铝液存放时间不超过2 h。

通过向熔融金属液中加入氢气,较大的缩松(缩孔或孔洞)消失,而被均匀弥散分布的气孔所代替,如图2所示,满足副车架支架内部质量要求。

表1 AlSi7Mg0.3铝合金主要化学成分
Table 1 Chemical composition of AlSi7Mg0.3 alloy

项目	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	其他元素
要求范围	6.5~7.5	≤ 0.19	≤ 0.05	≤ 0.10	0.25~0.45	≤ 0.07	≤ 0.25	其他元素 $\leq 0.03\%$,总计 $\leq 0.10\%$,其余为Al
实际成分	6.89	0.15	0.02	0.06	0.39	0.02	0.18	-

2.2 铸造工艺设计

采用重力倾转浇注方式可以有效减小铝液进入模具型腔后的落差，减少铝液飞溅时产生的氧化夹渣，同时可以避免出现裹气现象（图3）。该生产工艺在国际上是成熟先进的浇注工艺，已在铝合金气缸盖等产品大批量应用。生产过程中辅助稳定可靠的自动化控制系统，大幅提高铸件质量、减少工人劳动量。该副车架支架为不完全对称的左右件，铸造模具采用一模两件形式，对称布置在模具型腔中，左右件居中设计成竖直主浇道，主浇道末端分出左右次浇道，分别对左右件进行独立充型。因产品结构呈现中心薄壁、四周厚大的形式，对厚大部位分别设置冒口进行补缩，减少缩松倾向。采用MAGMA软件进行充型、温度、缩松缺陷等模拟优化，最终工艺出品率为37.5%（产品重量除以铸件、浇道、冒口等总重量）。

浇注前先对模具采用天然气预热，模具温度达到220~260℃时进行涂料喷涂。涂料种类有4种，包括底层涂料、型腔保温涂料、浇道冒口保温涂料、润滑涂料。底层涂料目的是使模具具有更好的粘附性，提高型腔保温涂层的使用寿命。底层涂料喷涂后，使用喷壶对铸件成形部位喷涂型腔保温涂料，型腔保温涂料颗粒细小，满足铸件表面光洁度要求。在模具浇道、冒口位置涂上另一种保温涂料，使用刷子人工刷涂，涂料厚度可以较厚以加大保温性，提高补缩能力实现顺序凝固。最后对模具的分型面、滑道部位喷涂

润滑涂料。采用多种涂料共同配合使用，确保铸件质量合格。

铝液浇注温度设定为 $(735 \pm 5)^\circ\text{C}$ ，整个浇注过程由自动倾转浇注机和机器人配合完成。浇注机器人根据指令用浇勺从保温炉中取铝，倒入模具浇口杯中，浇注机带动模具倾转，倾转速度 $6\text{ s}/90^\circ$ ，铝液沿着金属型从浇口杯中平稳流入模具型腔。充型结束后开始进行冷却。模具内部设计22路冷却水路对局部位置进行点冷，冷却水温度为 $10\sim 30^\circ\text{C}$ ，流量 $3\sim 6\text{ LPM}$ ，压力 $2\sim 4\text{ bar}$ 。同时为了保证实现顺序凝固，需对模具局部进行加热。充型冷却时间为145 s，冷却后浇注机恢复水平位置，模具开模，浇注全过程时间约300 s/模次。每套模具一次生产1件左支架和1件右支架，凝固后由机械手从模具中取出铸件后自动送至清理单元。

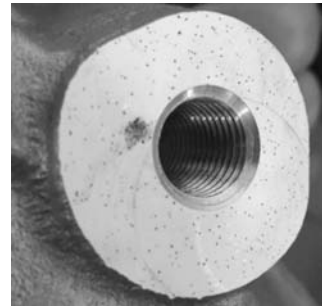


图2 加氢后形成均匀分布的气孔
Fig. 2 Evenly distributed pores after hydrogenation

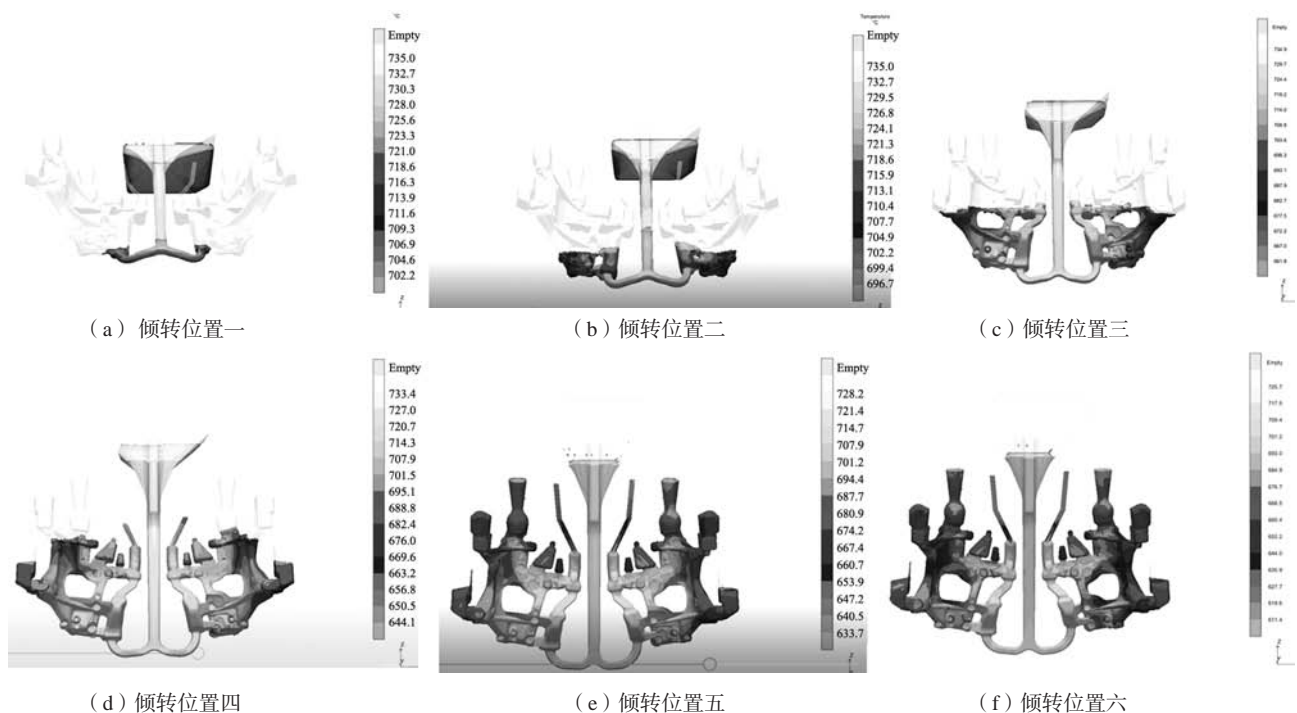


图3 重力倾转铸造过程

Fig. 3 Process of gravity tilting casting

清理单元内的机器人抓取冷却后铸件送至冷却水槽内进行冷却,冷却至常温后,由机器人抓取铸件送至带切边机去冒口、锯机去除浇道,然后在铸件上打印二维码和明码数字,从而实现对铸件的身份证定义,浇注工艺信息上传至IT服务器,保证产品具备可追溯性。整个浇注清理过程中操作者只需对模具进行手工喷涂和清理,其他所有动作均由设备根据程序设定自动控制完成,大幅减少了操作者劳动强度。

2.3 热处理工艺

副车架支架采用T6热处理工艺,热处理炉为通过式热处理炉,在固溶处理后进行淬火处理,淬火介质为水,淬火后待铸件冷却后进行人工校正,先将铸件放置在尺寸检测仪上进行尺寸检测,测量铸件变形量,根据检测结果对铸件变形位置进行校正,校正后的铸件再次进行尺寸检测,确认合格后,送入时效炉进行时效处理。热处理工艺如表2所示。

热处理料框需进行特殊设计,对铸件易变形位置进行定位和支撑,防止铸件在高温处理过程中变形,同时要保证铸件在热处理过程中受热均匀、便于操作者上下料,定位工装如图4所示。时效后进行力学性能检测,热处理不合格的铸件最多允许重复进行3次热处理。热处理、校正全过程需对铸件扫描追溯,储存工艺信息。

3 铸件性能分析

3.1 X光探伤结果

采用在线X光探伤机,设定多个探测角度,覆盖铸件全部位置,通过合理设计浇注系统、冷却水路、模具温度,以及优化涂料喷涂工艺,铸件受力区域、功能区域和一般区域内部质量合格,满足产品要求。

3.2 金相检测及孔隙率

铸件本体取样,图5为在金相显微镜下观察的金相组织,可以看到 α -Al枝晶大小均匀,共晶硅中细小颗粒状,组织变质及热处理正常,个别视场有较小的圆形第二相,有条状、块片状等不规则形态的第二相,均匀分散分布。

因采用加氢处理工艺,铸件内部分布细小氢孔,通过金相显微镜判定气孔分布状态,结果表明气孔分布均匀,满足单个孔径缺陷及孔隙率要求,如图6所示。

3.3 力学性能

力学试样从铸件本体取样,每个铸件取2根力学试样。使用Zwick Z100 电子万能材料试验机进行检

测,试验条件参照GB/T228 A224,弹性模量测量速度0.000 25/s,屈服点及屈服范围速度0.000 25 /s,试验速度0.006 7/s,室温(23±5)℃。试样标准参照DIN 50125-A5×25(图7)。硬度检测样品和拉伸试棒取自同一铸件,试验条件参照GB/T231.1—2009。经T6热处理后,副车架力学性能能够满足产品要求,检测结果如表3所示。

表2 T6热处理工艺
Table 2 Heat treatment process

固溶温度	固溶保温时间	淬火水温	时效温度	时效保温时间
530 ℃	160 min	40~60 ℃	175 ℃	90 min

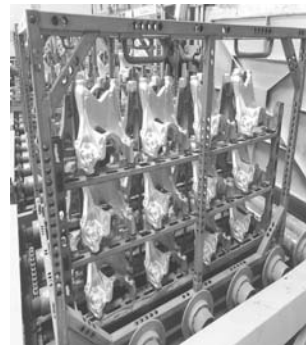


图4 热处理定位工装

Fig. 4 Heat treatment positioning tooling

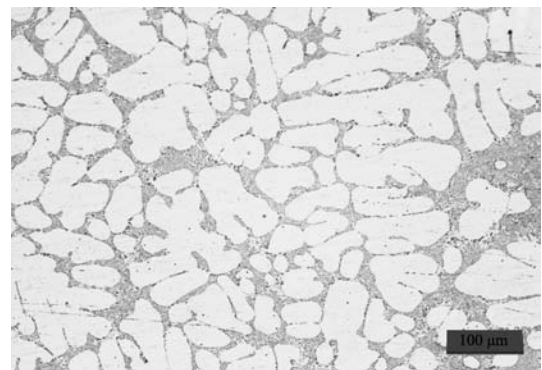


图5 金相组织

Fig. 5 Metallographic structure

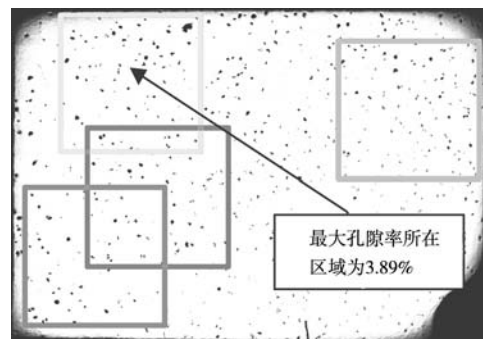


图6 气孔分布状态

Fig. 6 Pore distribution

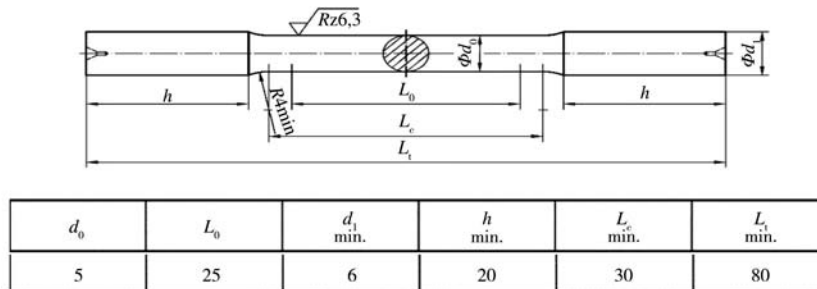


图7 拉伸试样示意图

Fig. 7 Configuration and size of tensile sample

表3 力学试样检测结果
Table 3 Mechanical properties of test pieces

序号	屈服强度 $R_{p0.2}$ /MPa	抗拉强度 R_m /MPa	伸长率 $A_{50\text{mm}}$ /%	硬度检测 (HBW)	
样件1	1#	231	283	3.2	91
	2#	239	286	3.1	84
样件2	1#	219	282	3.5	85
	2#	232	297	4.7	84
样件3	1#	216	284	5.7	85
	2#	219	276	4.5	86
样件4	1#	226	282	3.7	89
	2#	227	295	5	88
样件5	1#	221	295	4.9	90
	2#	211	288	4.4	82
平均值	224.1	286.8	4.3	86.4	

3.4 功能试验

加工后的副车架支架进行螺栓装配，与副车架及周边伴随件组成副车架总成，进行台架试验。台架试验包括发动机轴承试验、稳定器连接试验、纵向受力试验、横向受力试验以及螺栓连接试验。经过额定载荷及试验轮次，副车架支架未发现断裂、局部裂纹等缺陷，通过试验认可。副车架支架进行整车碰撞试验和典型工况试验，满足实验要求，产品性能合格。

铸造成形困难，对内部质量、力学性能要求严格，采用金属型重力倾转铸造工艺及T6热处理完成产品开发，铸件质量、尺寸精度和力学性能均满足要求，成品率达90%以上。

(2) 采用国内外先进工装备，实现关键工序自动化控制，所有工序均可实现工艺参数记录与上传，满足底盘安全件信息追溯要求，质量保证能力达到国际领先水平，已累计向客户交付80余万件。

4 结束语

(1) 副车架支架为底盘安全件，产品结构复杂，

参考文献:

- [1] 陈来, 王占坤, 邹纯, 等. 汽车用铝合金副车架成形工艺及应用现状 [J]. 铸造, 2019 (4): 392.
- [2] 张东萍, 徐淑红. 氢对铝及铝合金生产的影响 [J]. 电子制作, 2012 (12): 205.
- [3] TIWARI S N, 牛小平. 氢气含量对铝合金铸件中缩孔缺陷的影响 [J]. 铸造, 1987 (10): 34-35.

Application of Gravity Tilting Casting Process to Aluminum Alloy Chassis Structure Parts

ZHANG Yun-feng, CONG Pei-jun, ZHANG Peng, WU He, ZHAO Yong-jian, ZHAO Jian-feng, LU Xiao-fan
(FAW Foundry Co., Ltd., Changchun 130011, Jilin, China)

Abstract:

The aluminum alloy chassis structure parts were produced by gravity tilting casting process. The chassis structure part is a subframe bracket for a luxury European brand chassis, the material is $ALSi7Mg0.3$, and the weight is about 3 kg. The size range is 330 mm×260 mm×250 mm. The minimum wall thickness is 5 mm, and the maximum wall thickness is 36 mm. The overall structure of the product in the shape of 'L'. By adopting gravity tilting casting process, hydrogenation refining process and T6 heat treatment process, the subframe brackets could reach the performance requirements of yield strength $R_{p0.2} \geq 190$ MPa, tensile strength $R_m \geq 230$ MPa, elongation $A_{50\text{mm}} \geq 3\%$ and hardness HBW80-110.

Key words:

chassis structure part; gravity tilting casting process; T6 heat treatment; hydrorefining treatment
