

一体式空心副车架快速试制工艺

李泽华, 冯志军, 苏鑫, 李宇飞, 阮明

(沈阳铸造研究所有限公司, 高端装备轻合金铸造技术国家重点实验室, 辽宁沈阳 110022)

摘要: 对铝合金一体式空心副车架开展砂型反重力铸造研制工作。为缩短铸件研制周期, 首先利用PROCAST软件对一体式空心副车架进行热分析, 根据分析结果设计砂型反重力铸造工艺, 进一步对铸件充型和凝固过程的流动场、温度场进行计算, 并结合缩松和氧化物数值模拟结果判断铸件内部缺陷大小及位置, 最终确定铸造工艺方案。在此基础上, 采用3D喷墨打印技术快速制备砂型、砂芯并浇注, 完成了一体式空心副车架的快速试制。对一体式副车架凝固过程进行了应力分析, 并利用激光三维扫描对比铸件热处理前后的变形情况。结果显示, 空心副车架铸件质量良好, 力学性能较高。

关键词: 铸造; 数值模拟; 3D打印

在汽车底盘结构件中, 车架是跨接在汽车前后的框架结构, 主要用于支撑、连接汽车的各零部件, 使之保持相对正确的位置, 并承受汽车内外的各种载荷。副车架是车架的一部分, 对汽车的车桥作用重大。传统汽车车架采用钢制焊接而成, 成本虽低但十分沉重, 随着新能源车辆的不断发展, 汽车轻量化要求不断提高, 传统钢制副车架已不能满足要求, 逐步被铝合金材料取代^[1]。

国内铝合金副车架生产大多采用铸造结合焊接或者压铸这两种工艺方式^[2-4]。采用压铸方法虽然生产效率高, 但多用于框架结构的副车架, 相比于空心副车架, 框架结构的副车架减震减重效果都有一定差距。目前多采用铸造结合焊接的方式生产铝合金空心副车架, 生产效率较低, 尺寸精度不高, 铸件质量一致性较差。国外一直在进行一体式空心副车架铸造工艺研究^[5-6]。加拿大Matinrea公司实现了一体式空心副车架的金属型批量铸造, 在其公司网站上对该生产线进行了展示, 其生产自动化程度高, 铸件质量稳定, 力学性能好, 生产成本低。空心副车架金属型整体铸造工艺技术具有较大的市场优势, 有取代其他制备工艺技术的潜力。国内目前并没有成熟的一体式空心副车架铸造技术。本研究根据现有车型结构, 设计出一体式空心副车架, 进行空心副车架一体式铸造技术攻关。

作者简介:

李泽华(1991-), 男, 硕士, 主要研究方向为铝、镁合金铸造技术及复合材料制备技术开发。E-mail: lzh19910723@sina.com

中图分类号: TG249

文献标识码: B

文章编号: 1001-4977(2019)05-0470-05

收稿日期:

2018-12-18 收到初稿,
2019-01-28 收到修订稿。

1 工艺方案

1.1 一体式空心副车架毛坯结构设计

传统空心副车架结构如图1a所示。由于空心副车架左右纵梁结构复杂, 存在内部空腔, 适合采用铸造方式。空心副车架上下横梁则多采用型材。横梁和纵梁之间则通过焊接方式连接。采用这种工艺方法制备铝合金空心副车架, 不仅生产周期长, 同时零件内部质量、力学性能以及尺寸精度都受到影响。将副车架横梁和纵梁结合为一体, 对焊接区域进行圆滑过度并适度减薄, 设计一体式空心副车架毛坯如图1b所示。

1.2 铸造数值模拟分析和工艺设计

根据铸件的结构及使用时的工况, 考虑采用低压反重力的工艺方案。利用

PROCAST数值模拟软件辅助一体式空心副车架的铸造工艺设计。首先对铸件毛坯进行热分析,图2a高亮区域为铸件在凝固后期的液相区域,图2b为缩松判据下,铸件内部收缩缺陷存在的位置和大小。结合图2a、b判断铸件凝固过程热节位置,在铸件四个爪顶部圆台等范围较大的热节位置放置冒口进行补缩,为提高冒口补缩效果,保证圆台加工面的内部质量,圆台底部放置冷铁激冷。除此以外,在铸件薄壁区域存在的少数孤立热节位置放置冷铁或者设置浇口。副车架表面还有部分加工定位用的小凸台,也放置冷铁调节凝固过程的温度场,使凸台与周围薄壁区域同时凝固。最后对部分铸件底部发生收缩的位置增设浇口进行补缩。

对充型和凝固过程流动场和温度场进行模拟。该工艺方案下铸型充型平稳,不存在大的起伏和飞溅。从铸件凝固过程的温度场(图3a)可以看出,铸件凝固过程温度梯度较为合理,对热节区域的补缩通道畅通,能够有效进行补缩。从铸件各部分凝固时间(图3b)来看,铸件薄壁区域存在的小凸台等孤立热节受冷铁作用,与附近区域同时凝固。最后凝固的热节位置凝固时由冒口进行补缩。由缩松判据可以得出铸件缩松缩孔缺陷基本存在于冒口和浇道中,图3c中铸件上仅有少数点状缩松区域显示。将判据尺度从1放大至2,缺陷显示消失,根据经验判断,实际铸造过程该区域产生收缩缺陷的可能性较低。图3d对铸件充型过程产生氧化夹渣情况进行模拟,铸件本体出现氧化夹渣

缺陷几率较低。

2 砂型快速制备

空心副车架纵梁内腔结构复杂,壁厚变化大,拐角、扭曲区域多,如果采用传统工艺,需设计复杂模具,模具加工难度大、时间长,不利于工艺改进,铸件生产成本低,研制周期长。本研究采用3D喷墨打印设备,利用喷墨打印头打印出粘结剂将砂粒粘接在一起,直接生产砂型和砂芯。省略了制模环节,缩短了产品生产周期,直接制作任意复杂形状的砂型,不受模具加工工艺限制,并且保证砂型精度。结合合理的浇注系统设计,可大幅提高铸件成品率,降低生产成本。采用的打印设备及所打印的砂型见图4。

利用3D喷墨打印技术,将一体式空心副车架分为上箱、下箱和内芯3部分,一体式空心副车架浇注系统集成于下箱。砂型、砂芯上预留冷铁槽位,砂块打印完成以后,将冷铁放置于冷铁槽中。一体式空心副车架内芯整体呈弓型:中间区域下凹,厚度20 mm左右,横截面狭小,4角区域上翘。内芯清理完成后转运到烘箱平台过程中极易从中间区域发生断裂。针对这个情况,在砂芯中间薄弱区域增加补贴提高强度,同时在底部设计支撑柱进行支撑,待砂芯热处理强化,表面涂刷涂料并干燥以后,再清理砂芯支撑柱以及补贴,整个砂芯打印耗时48 h,打印完成后组型埋箱,进行低



图1 传统副车架与一体式副车架
Fig. 1 Traditional sub-frame and integrated sub-frame

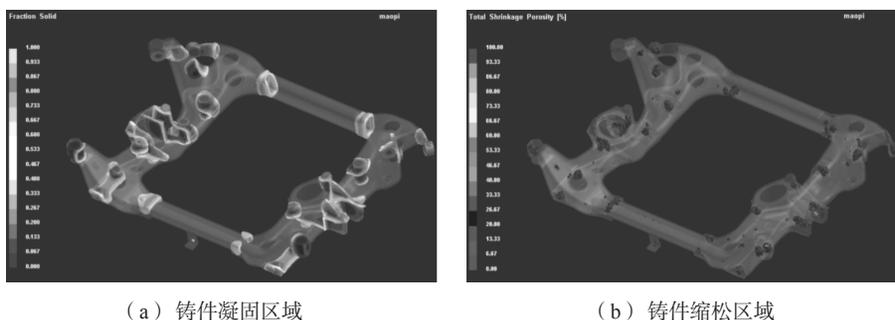


图2 铸件最后凝固和缩松区域
Fig. 2 Final solidification zone and shrinkage zone of castings

压浇注。

3 一体式副车架尺寸精度、内部质量及力学性能

3.1 铸件凝固过程应力分析和铸件铸态尺寸变化

利用3D打印制备一体式副车架的外皮和内芯，砂型精度 ± 0.3 mm，造型组型过程的尺寸偏差小。但一体式副车架整体壁厚4.5 mm，存在多处厚大凸台与薄壁交接的部位，所以采用PROCAST对凝固过程铸件内部的应力进行模拟。从图5a可以看出，一体式副车架左右横梁以及纵梁的上下两端应力较大，在铸件凝固过程中受应力影响可能会发生变形。从图5b的热裂倾向分析可以看出，一体式副车架热裂倾向较低，应力集中区域位于浇、冒口根部区域。

一体式副车架浇注完成后进行清理和打磨，去除铸件浇道、冒口及飞边等，清理并喷砂后的铸件外表如图6a所示。采用激光三维扫描仪对铸件进行三维扫描，将扫描结果和铸件模型在Geomagic Control X软件中进行对比，分析铸件尺寸变化。从图6b可以看出，一体式副车架左右纵梁的上、下爪均有一定程度下塌，其中左上、左下及右下爪变形量较小，分别为 -0.7 mm、 -1.2 mm和 -1.9 mm，而右上爪下塌 3.9 mm，

上方横梁上凸 1.4 mm，下方横梁上凸 2.5 mm，铸件一体式呈外张趋势。对比铸件应力模拟结果，铸件应力较大的位置均出现一定程度的变形。右上爪变形量较其他3爪大的原因是该位置上方冒口清理时受到了敲击。后续3爪上方的冒口改用电锯切割，虽然花费时间稍长，但避免了外力冲击使铸件变形加剧。

3.2 热处理过程尺寸控制

首先对副车架进行固溶处理，提高铸件伸长率，避免一体式空心副车架在矫形过程中出现裂纹。由于固溶处理温度高，高温铸件出炉后12 s内水淬，因此固溶过程会出现二次变形。为避免铸件整体变形趋势发生改变增大矫形难度，在固溶前设计热处理工装，将铸件4爪装夹于工装上进行固定，采用立柱支撑副车架底部平台及部分可能变形位置，立柱另一端紧固在工装底部平台上。固溶处理后，铸件尺寸精度变化如图7a所示，可以看出上下横梁相比于固溶前下凹 $1\sim 2$ mm，左右纵梁相比于之前上翘 $2\sim 3$ mm。

设计铸件矫形工装，利用工装夹紧副车架变形程度较轻的2爪，对铸件横梁底部及其他悬空位置进行支撑。利用液压钳压紧横梁上方避免在矫形过程中上翘，根据扫描结果矫正另外2爪的空间位置，通过敲击振动方式释放矫形时铸件内部产生的应力。将矫正后

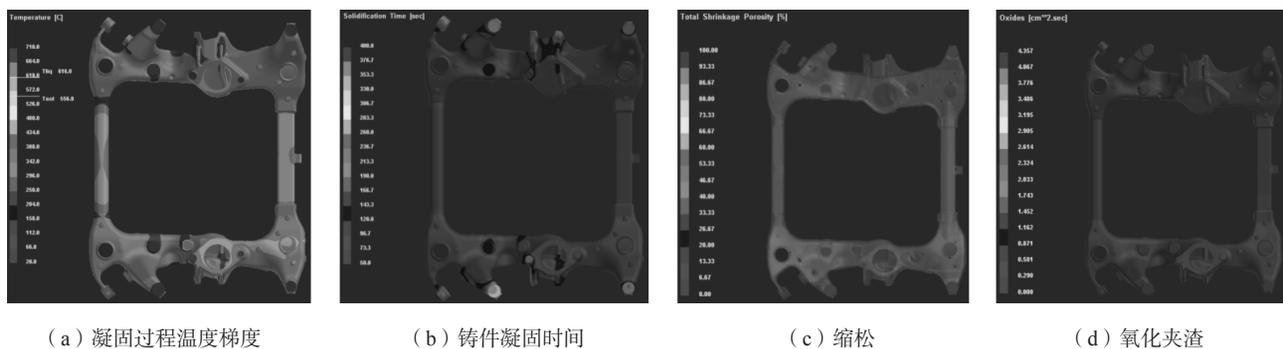
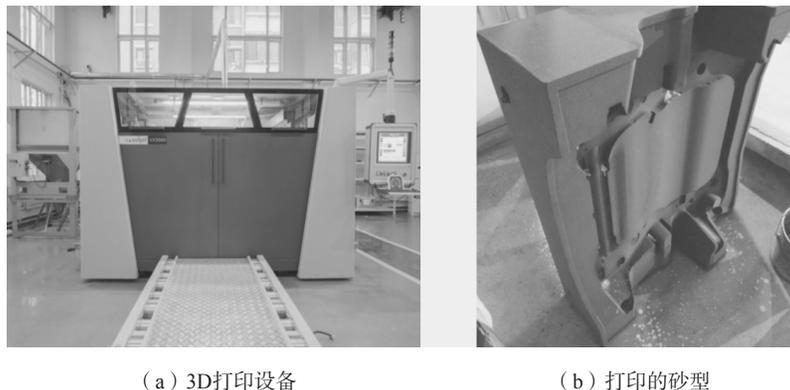


图3 铸件凝固过程数值模拟

Fig. 3 Numerical simulation of solidification process of castings



(a) 3D打印设备

(b) 打印的砂型

图4 采用的3D打印设备及砂型

Fig. 4 3D printing equipment and sand moulds

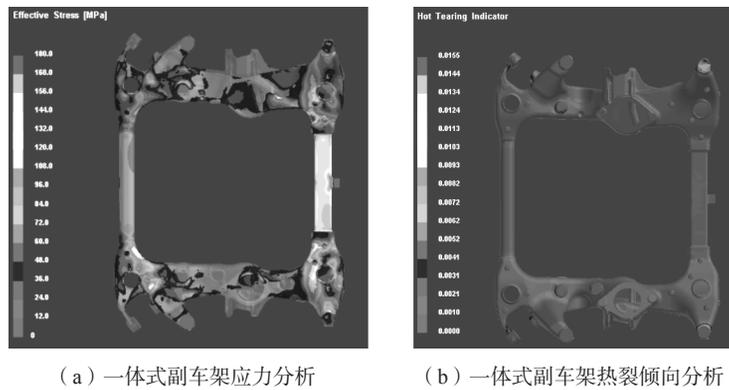
的2爪夹紧，按照以上步骤矫正其他爪。最后将铸件4爪全部夹紧，观察铸件横梁局部变形量，采用液压钳上撑和下压，使铸件横梁尺寸满足要求。图7b为矫形前后铸件尺寸情况，矫形之前铸件4爪下塌量大于2 mm，其他位置也呈现出不同程度的上凸和下凹，偏移量在1.5 mm左右。矫形后铸件4爪位置的下塌量均在2 mm以内，由于4爪位置均留有5 mm加工余量，因此铸件尺寸偏差已在公差范围内，且加工面余量均在2 mm以上。同时，铸件其他位置偏移量均在1 mm以内，满足铸件尺寸精度CT9要求。

将矫形完成的铸件重新放置在时效炉中进行处理，出炉后再次检测，时效过程中铸件尺寸未发生明

显变化，满足加工要求。

3.3 一体式副车架冶金质量和力学性能

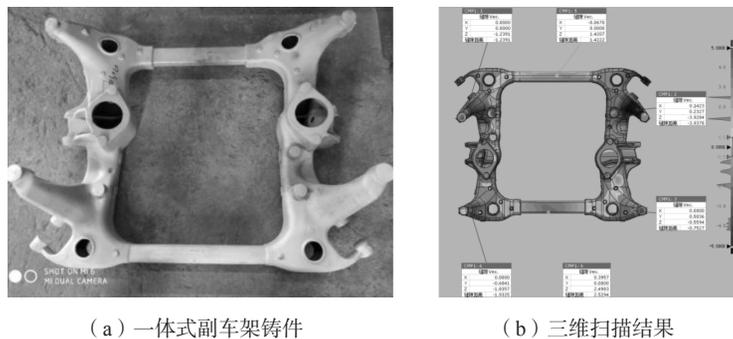
一体式副车架X射线探伤结果显示，副车架仅在个别非关键区域存在2级缩松，其他区域内部质量良好。渗透检测表明铸件表面质量良好，表面不存在裂纹、砂眼、缩松和缩孔。空心副车架力学性能要求抗拉强度 $R_m \geq 280$ MPa，屈服强度 $R_{p0.2} \geq 250$ MPa。3D打印时铸件浇道位置放置了厚度不同的辅助试片，试片没有放置冷铁，因此内部均存在一定缩松，将辅助试片与空心副车架同炉热处理后进行拉伸，试片T4和T6处理后力学性能如表1所示，T6试片力学性能满足要求。



(a) 一体式副车架应力分析 (b) 一体式副车架热裂倾向分析

图5 一体式副车架应力和热裂倾向分析

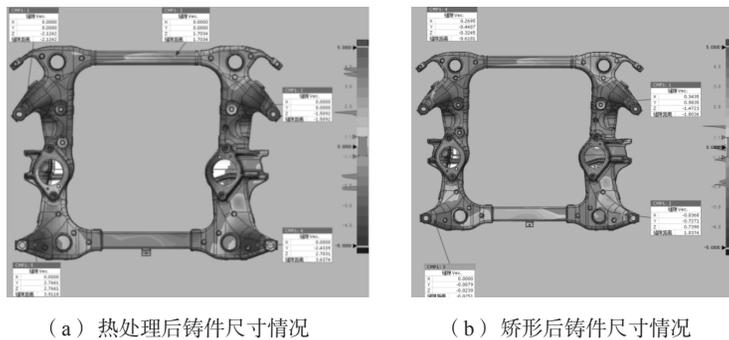
Fig. 5 Stress and hot crack tendency analysis of integrated sub-frame



(a) 一体式副车架铸件 (b) 三维扫描结果

图6 一体式副车架铸件及三维扫描结果

Fig. 6 Integrated sub-frame casting and three-dimensional scanning results



(a) 热处理后铸件尺寸情况 (b) 矫形后铸件尺寸情况

图7 热处理和矫形后铸件尺寸情况

Fig. 7 Dimension changes of integrated sub-frame after heat treatment and shape-righting

表1 副车架辅助试片力学性能
Table 1 Mechanical properties of auxiliary test pieces of sub-frame

热处理状态	试片厚度/mm	内部质量	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
T4 (540 °C/12 h)	8	缩松2级	255	167	8.0
	5	缩松2级	253	169	7.5
T6 (175 °C/6 h)	8	缩松2级	297	265	3.5
	5	缩松2级	294	263	3.5

4 结论

(1) 采用3D喷墨打印快速制备一体式副车架外皮及内芯, 在短时间内开发出一体式空心副车架砂型反重力铸造技术, 铸件质量、尺寸精度和力学性能均满足要求。

(2) 利用数值模拟优化一体式副车架铸造工艺, 分析铸件凝固过程应力分布, 再结合三维尺寸扫描技术对铸件尺寸快速检测, 有效缩短了铸件的开发周期, 为一体式副车架金属型低压反重力铸造技术开发打下基础。

参考文献:

- [1] 孙超. 铝合金副车架在电动汽车中应用的必然性 [J]. 科学技术创新, 2018 (11): 170-171.
- [2] 雷衡兵. 真空压铸铝合金副车架铸造工艺仿真与疲劳寿命研究 [D]. 湖南: 湖南大学, 2017.
- [3] 许若震, 姜银方, 孟祥豹, 等. 汽车前副车架挤压铸造数值模拟研究 [J]. 热加工工艺, 2016, 45 (21): 94-96.
- [4] 顾勇, 李芳, 徐佳利, 等. 铸造铝合金前副车架焊接技术研究 [J]. 热加工工艺, 2016, 45 (9): 39-42.
- [5] 史东杰, 张宇, 王连波, 等. 汽车铝合金副车架应用现状 [J]. 轻合金加工技术, 2015, 43 (8): 16-19.
- [6] 陈磊, 程稳正, 孙珏, 等. 铝合金铸造副车架开发 [J]. 汽车技术, 2015 (2): 58-62.

Rapid Trial Production Process of Integrated Hollow Sub-Frame

LI Ze-hua, FENG Zhi-jun, SU Xin, LI Yu-fei, RUAN Ming

(Shenyang Research Institute of Foundry Co., Ltd., State Key Laboratory of Light Alloy Foundry Technology for High-End Equipment, Shenyang 110022, Liaoning, China)

Abstract:

Anti-gravity casting technology of aluminum alloy integrated hollow sub-frame was researched. To shorten the development cycle of castings, thermal analysis of integrated hollow sub-frame was carried out with PROCAST software firstly. Based on the analysis results, the anti-gravity sand mould casting process was designed, and then the flow field and temperature field during filling and solidification of castings were calculated. The size and location of internal defects in castings were judged with the help of simulation results of shrinkage and oxide inclusions. Finally the casting process was improved. On this basis, sand moulds and cores were rapidly prepared by 3D inkjet printing technology, and the rapid trial production of integrated hollow sub-frame was completed successfully. The internal stress of the solidification process was analyzed, and the dimensional changes of the castings before and after heat treatment were compared using three-dimensional laser scanning technology. Results show that the quality and mechanical properties of sub-frame all meet the technical requirements.

Key words:

casting; numerical simulation; 3D printing