

乘用车镁合金座椅靠背的开发与应用

崔晓鹏¹, 张艳新², 刘海峰², 李鑫磊², 韩 星²

(1. 先进结构材料教育部重点实验室, 长春工业大学材料科学与工程学院, 吉林长春 130012;

2. 中信戴卡股份有限公司, 河北秦皇岛 066011)

摘要: 以某款车型的钢板冲压焊接座椅靠背为研究对象。通过轻量化设计, 实现了以集成结构为核心的镁合金座椅靠背的开发, 并采用高压铸造工艺完成了铸件试制, 产品达到了49.6%的减重效果。结构设计、模拟仿真和碰撞试验表明, 镁合金座椅靠背能够满足座椅的使用需求, 并大幅度降低重量和生产成本, 满足整车轻量化的需求。

关键词: 座椅靠背; 镁合金; 高压铸造; 碰撞试验

作者简介:

崔晓鹏 (1972-), 女, 教授, 博士, 研究方向为轻量化设计开发。E-mail: cuixiaopeng2004@126.com

通讯作者:

张艳新, 男, 高级工程师, 学士。E-mail: zhangyanxin@dicastal.com

中图分类号: TG146.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977 (2022) 05-0637-08

基金项目:

稀土资源利用国家重点实验室开放课题资助项目 (RERU2016001, RERU2018001)。

收稿日期:

2021-10-25 收到初稿,
2021-12-24 收到修订稿。

随着排放法规的日渐严格, 降低整车重量已经成为目前乘用车重要的开发方向^[1-2]。作为重要的车身附件, 座椅有较大的轻量化空间^[3], 一般乘用车座椅的平均价格在850~1 050美元左右, 中档乘用车在1 400~1 600美元左右, 高档的则要超过2 000美元, 对于大多数手动挡乘用车而言, 座椅的成本占整车成本的5%, 仅次于发动机。随着汽车座椅舒适性和安全性要求的不断提高, 座椅的附加结构不断增加, 其重量也显著上升^[4]。

在座椅总成中, 座椅骨架是汽车座椅中最基础的结构, 靠背骨架是其重要部件之一, 目前主要由钢板冲压焊接而成^[5]。但随着整车对座椅轻量化的要求日益提高, 热塑性塑料成形骨架、镁合金骨架以及碳纤维增强复合材料骨架等成为目前重要的开发方向^[6]。在上述三种材料中, 热塑性塑料成形骨架的成本最低, 但力学性能较差, 且回收性能较差; 镁合金骨架成本居中, 具有良好的力学性能, 可以充分利用铸造过程的优势实现复杂集成结构的应用, 并可实现100%完全回收; 碳纤维增强复合材料骨架力学性能优秀, 但价格昂贵且无法回收, 仅在少量高档乘用车和赛车上应用。因而, 综合比较上述材料, 镁合金具有广阔的应用前景, 并成为目前研发的重要方向之一^[7]。

目前轻量化的镁合金座椅骨架主要的生产工艺有型 (管) 材+焊接工艺^[8], 高压铸造^[9]和半固态注射^[10]三种工艺。型 (管) 材+焊接工艺在上汽新能源汽车轻量化开发中得到了应用, 但仅为概念产品, 未进入批量生产; 半固态注射成形工艺也是仅仅进行了前期试验, 如佛吉亚集团位于斯特哈根研发中心验证试验^[11], 以及国内江森与山东银光集团进行的前盆铸造试验等, 未进入批量生产。高压铸造工艺则在镁合金座椅骨架的生产方面得到了广泛的应用, 目前已经进入批量生产的座椅骨架有阿尔法罗密欧、捷豹等镁合金座椅骨架^[12], 奔驰、宝马以及韩国现代集团也曾经尝试使用高压铸造方法生产镁合金座椅骨架^[13]。因而对于镁合金座椅骨架而言, 高压铸造工艺是目前最为成熟和具备竞争能力的生产工艺。

本研究以某型量产车型的钢板冲压焊接座椅骨架为轻量化目标, 基于镁合金及高压铸造工艺, 通过集成化设计试图实现轻量化座椅骨架的开发。

1 产品的选取与分析

某款车座椅靠背的现有制造工艺为钢板冲压焊接, 以此工艺制备的产品为基准

部件,进行镁合金座椅靠背的开发,如图1所示。

该产品总体的开发要求如下:以原有的钢板冲焊座椅为原型,最大限度地借用原有部件,实现结构的通用化;在对原有部件进行集成化和轻量化设计的基础上,实现集成化铸件的设计与应用,并采用高压铸造工艺完成部件的设计;完成整椅的装配和相关试验。除此以外,对镁合金座椅骨架的主要开发要求如下:

结构要求:要求镁合金座椅骨架的碰撞性能与基准部件相当。镁合金是实际工程应用中最轻的金属材料,其绝对强度低于钢板,但是可以充分利用铸造工艺的优势,通过结构保证碰撞性能。

重量要求:要求与取代部件相比,更改材料后重量降低15%以上。镁合金的密度为 1.8 g/cm^3 ,远远低于原有的钢板材料。在目前应用镁合金取代原有钢板冲焊部件的应用实例中平均可以达到35%以上的减重效果。考虑到H7座椅功能性要求,无法将前盆和侧板集成为一个铸件,减重效果会有所降低,但是靠背可以集成为一个铸件,综合上述考虑,应该能够达到15%的减重效果。

耐蚀性要求:要求满足OEM的耐蚀性要求。本项目开发过程中将使用高纯镁合金,其耐蚀性能已经超过了A380铝合金,加之其为内饰部件工作环境并不苛刻,其耐蚀性能能够满足要求。

安装要求:要求满足原有的安装条件,可实现直接替换。在局部结构更改过程中,将不涉及与其他部件有装配关系的部分,结构调整后,部件的装配关系



图1 镁合金座椅骨架开发的基准部件

Fig. 1 Reference component for magnesium alloy seat frame

不变,可实现直接替换装配。

成本要求:要求在满足台架要求的同时,控制成本增加不超过15%。部件的成本控制是铸件开发的一个重要因素。镁合金材料成本远高于钢板部件,但是通过集成设计和铸造工艺的方法取消了原有制造工艺中的冲压,焊接以及相关装配的环节,其制造成本远低于钢板冲焊部件,考虑到两种材料优势和劣势,经过初步估算,实现综合生产基本相当是完全有可能的。

2 产品的设计与分析

2.1 材料选择与设计

目前常用的镁合金牌号主要有AM50A、AM60B以及AZ91合金,此外还有一些特殊的耐热合金如AS41和AE44等,主要用于动力系统耐热部件的生产。考虑到合金的通用性、标准应用以及质量控制等方面的原因,镁合金座椅靠背骨架将从AM50A、AM60B以及AZ91合金中进行选择,其成分和力学性能如表1所示^[14],可见三种合金最明显的区别就是伸长率。考虑到镁合金座椅骨架在碰撞试验中所要满足的苛刻要求,最终决定选择具有更好伸长率的AM50A合金。

尽管AM50A合金具有良好的伸长率,但是熔化温度区间是三种合金中最高的(图2a),其压铸温度接近 $690\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。另外,其Al含量是三种合金中最低的,因而其铸造性能较差,需要在模具设计和铸造工艺方面进行更多的考虑。与此同时,为了提高合金的性能,在AM50A合金的基础上,通过添加少量稀土对合金进行了改性。改性后的合金成分以及流动性测试如表1和图2b所示。可见经过添加少量稀土后,可以显著提高合金的流动性,并提高合金的伸长率,从而有效降低合金的铸造工艺难度。

2.2 概念设计方案

图3示出了镁合金座椅概念设计方案。概念设计方式是基于原有座椅结构进行设计,原有的设计参考点和安全带总成旋转中心均为发生改变,座椅总成的主要参数如下:滑道:电动;滑轨总行程:240 mm,向前行程200 mm,向后行程40 mm;靠背角行程:向前

表1 不同镁合金成分及力学性能

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of different magnesium alloys

合金	主要合金成分				力学性能		
	Al	Mn	Zn	RE	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
AM50A	4.4~5.4	0.26~0.60	0.22	-	240	130	10
AM60B	4.5~5.5	0.24~0.60	0.22	-	230	125	7
AZ91D	8.3~9.7	0.15~0.50	> 0.35	-	250	160	2
AM50A-RE	4.4~5.4	0.26~0.60	0.22	0.25~0.30	260	135	15

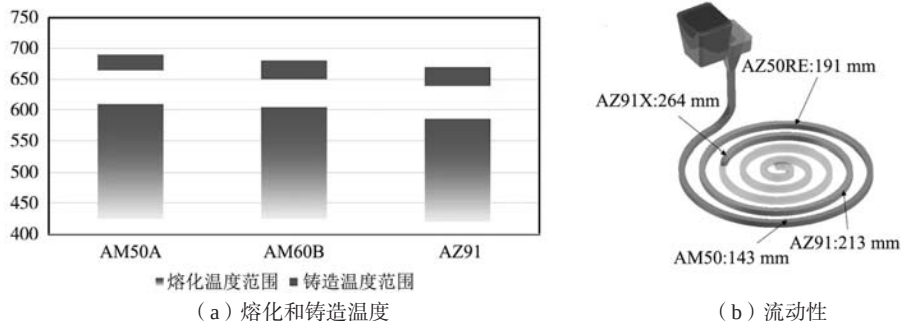


图2 不同镁合金铸造特性

Fig. 2 Casting characteristics of magnesium alloys with different chemical compositions

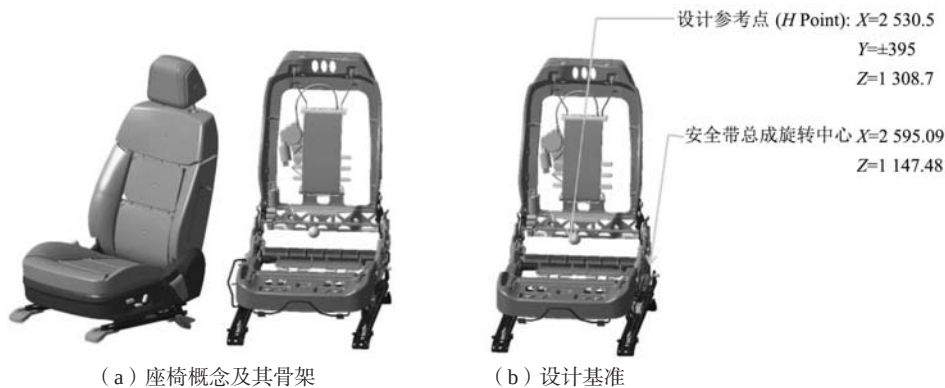


图3 镁合金座椅概念设计方案

Fig. 3 Conceptual design scheme of magnesium alloy seat frame

17°, 向后53°; 座盆高度调节行程: 向上行程28 mm, 向下行程25 mm; 前倾行程: 9.3 mm。主副座椅靠背骨架为共用件, 座椅H点和安全带旋转轴, 以及滑轨地脚固定点与现有座椅保持一致。

镁合金靠背集成了侧板、上下横梁以及塑料件的固定点, 通过铸造工艺一次成形, 提升整体精度, 工艺上减少装配过程, 节约时间。镁合金材料的运用, 在保证原有强度和硬度下, 使得重量大大减少。一体化的结构对于整体稳定性有很大的帮助, 不需要焊接, 没有了焊缝撕裂的风险, 受冲击时的能量得以更好地分散。设计上, 铸件拥有更多的设计自由度, 可以实现复杂的造型, 不需要额外的焊接工序。

镁合金座椅骨架的结构设计是其开发的关键步骤, 在集成周围部件的基础上, 合理的设计铸件结构以满足碰撞要求是其结构设计的核心。座椅设计方案的评审主要分为两个方面: 其一是针对在CAE分析过程中出现的结构无法满足要求的情况进行结构调整和加强; 其二是借助铸造模拟软件, 针对充填过程中出现的不利于金属熔体流动的结构进行调整。

图4示出了镁合金座椅靠背结合铸造工艺的结构评审。主要评审内容如下: 镁合金座椅靠背的进料方式如图4a中箭头所示; 根据试制结果分析, 图4b中以标示的区域为最后充填区域, 其充填难度较大, 且本体

力学性能, 特别是伸长率较低。结构更改优化如下: 首先将座椅靠背下部按照左右两侧所示切开形成原有的框架结构, 按照所示方向, 沿原有曲面分别形成横梁和纵梁, 如果FEA的计算表明强度不足, 可在横梁间增加桁架筋(图4a“x”标示部分)。

在整个设计过程中, 共进行了多次较大的结构评审与更改, 最终, 重量仅有1 476 g(现有座椅靠背骨架重量为2 927 g), 减重49.6%。

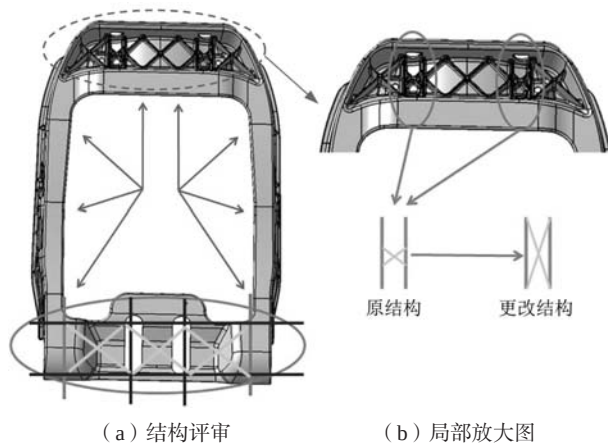


图4 座椅靠背的结构评审及变更

Fig. 4 Structural review and improvement of seat back frame

2.3 座椅设计方案结构评审

在完成结构基本设计后，就进入结合结构分析（CAE）进行铸件结构评审阶段。按照目前奥迪Q3及A6的座椅标准，共有200多项法规及其相关试验需求。对于座椅骨架要求最为苛刻的是假人在95%位置（将座椅调高至95%位置）时的前撞试验和后撞试验。其中后撞试验中主要的测试对象是镁合金座椅靠背以及侧板，在前撞试验中主要的测试对象是镁合金前盆。因而本文在铸件结构分析时选取后撞工况进行分析。

对于靠背而言，在碰撞试验中要求较高的区域为头枕区域和安装调角器的区域及该区域上部。在碰撞试验过程中镁合金座椅靠背允许变形，但是不允许发生断裂。尽管在前面材料选择以及性能分析部分已经指出，其伸长率在铸件性能要求较高的区域可以达到15%左右，但是为了提高设计冗余，在结构分析时仍然将伸长率的上限设为10%。

由图5的分析结果可见，镁合金座椅靠背弹塑性变形较大的区域主要集中在调角器连接孔区域及其附近区域，头枕部位相对可靠。弹塑性变形最大的区域为49.2%，其余部位均未超过10%。经检查模型单元划分和约束条件，并考虑到调角器为左右配置，受力情况相同，确认该处为模拟状态下的应力集中，在实际工况中应该不会出现如此大的变形，座椅靠背整体结构

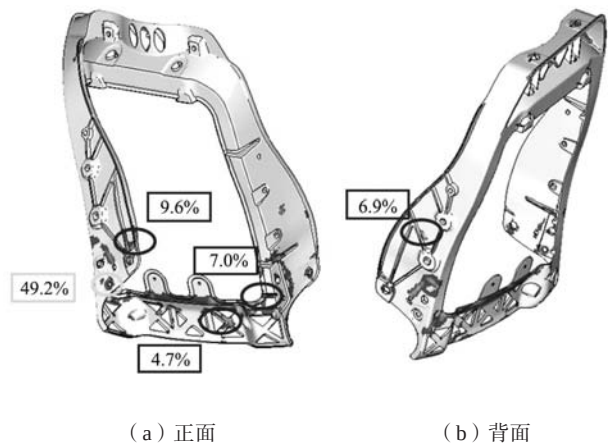


图5 镁合金座椅靠背后撞分析结果
Fig. 5 Analysis results of rear impact of magnesium alloy seat back frame

满足要求。

经过针对结构强度和铸造工艺的结构更改，座椅骨架的CAE分析结果以及相关条件如表2所示，按照设定的分析条件，所有座椅骨架通过了CAE分析，随后确定了铸件结构，开始进行铸造工艺方案的设计。

3 工艺开发与应用

3.1 工艺基本描述

基于高压铸造工艺，图6示出了靠背铸造工艺基本描述，铸件对性能要求较高的区域为安装头枕部位（图6中的区域A和B）和安装调角器的部位（图6中的区域C和D），因而在浇注工艺设计中首先考虑到将上述部位设计内浇道，保证铸件的性能满足要求。

3.2 工艺开发及改进

图7示出了靠背铸造工艺开发过程。座椅靠背的铸造工艺设计方案可以分为两个大的方案，方案A至方案D为一个基本设计方案，其主要特征是：首先在要求较高的部位设置内浇道，对于安装座椅骨架拉丝弹簧部位为未设置内浇道，根据充填模拟的结果调整内浇口的厚度、位置以及方向，并根据铸件最后充填位置调整溢流槽的位置，以保证能够容纳充填熔体的前端，避免在铸件内部产生氧化渣；方案E-H则是在上述方案的基础上，考虑到原有方案在安装座椅骨架拉丝弹簧

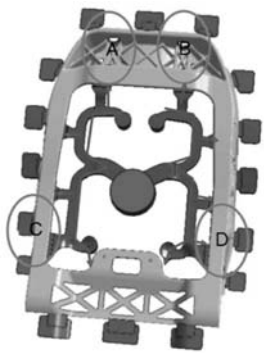


图6 靠背铸造工艺基本描述
Fig. 6 Basic description of casting process for seat back frame

表2 CAE分析结果
Table 2 Analysis results obtained by CAE

运行编号	几何体状态	负载/脉冲	假人	座椅类型	座椅调节	结果
SH141047	循环A	FMVSS210/207（120%载荷）	/	8WP	FMUMUM	OK
SH141056	循环A	FMVSS210/207（120%载荷）	/	8WP	FMUMUM	OK
SH141035	循环A	后向纵向扭矩（2 400 N·m）	/	8WP	DP	OK
SH141385	循环E	前向纵向扭矩（1 500 N·m）	/	8WP	DP	OK
SH141473	循环G	FC（最大加速度50g）	D95	8WP	RMUMUM	OK
SH141635	循环J	FC（最大加速度23g）	D95	8WP	RMUMUM	OK

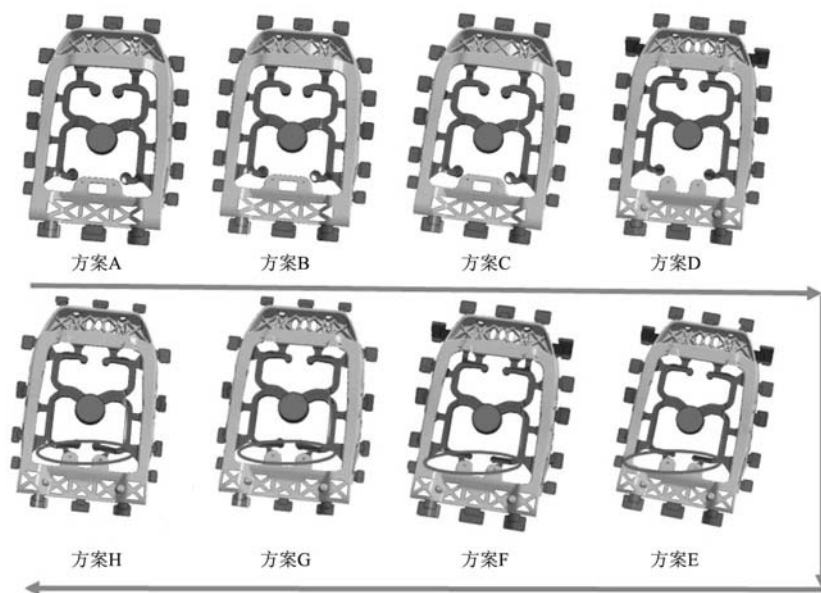


图7 靠背铸造工艺开发过程

Fig. 7 Development process of casting process of the seat back frame casting process

部位的充填时间较晚,熔体温度下降较快,容易引起冷隔等缺陷,在安装座椅骨架拉丝弹簧部位增加设置两道内浇口。方案E-H为基于此种铸造工艺基础上进行的工艺详细设计,根据充填模拟的结果调整内浇口的厚度、位置以及方向,并根据铸件最后充填位置调整溢流槽的位置,以保证能够容纳充填熔体的前端,避免在铸件内部产生氧化渣。

图8示出了不同工艺方案充型时间和工艺的模拟,可见工艺方案A的模拟结果,以及经过一系列改进后至工艺方案D的模拟结果。由图8的分析结果可见,在设计内浇口的靠枕区域和安装调角器的部位首先获得充填,但是在安装座椅骨架拉丝弹簧部位充填时间较晚,将会产生一定冷隔,并影响到铸件的本体性能,因而在此基础上还需要进一步的改进。

图8c示出了工艺方案E充型时间的模拟结果,以及经过一系列改进后至工艺方案H的模拟结果。由上图的分析结果可见,通过在安装座椅骨架拉丝弹簧部位增加内浇口(如图8中椭圆所示),可以显著改善该区域的充填时间。通过一系列工艺方案的调整和优化后的工艺方案H的充型时间以及空气压力的模拟方案如图8d所示,由模拟结果可见,铸件性能要求较高的区域,如靠枕部位和调角器部位等均为首先充填部位,由空气压力模拟结果可见,在充填和凝固过程,铸件内部的气压较低,仅一些局部区域的气压偏高,但仍然在可以接受的范围内,不易形成气孔,从而保证铸件具有良好的力学性能。综合上述的设计和分析结果,确认方案H为最终的设计方案。

3.3 工艺确认

图9示出了座椅靠背铸造设计方案A至方案H的基本设计数据,包括铸件重量、料饼重量、渣包重量以及浇道重量。图9中的纵坐标是带有浇注系统、料饼、渣包以及铸件的总重量,在每个工艺方案的上部以百分数的形式表示工艺出品率,见式(1)。

$$\text{工艺出品率} = \frac{\text{铸件重量}}{(\text{铸件重量} + \text{料饼重量} + \text{渣包重量} + \text{浇道重量})} \times 100\% \quad (1)$$

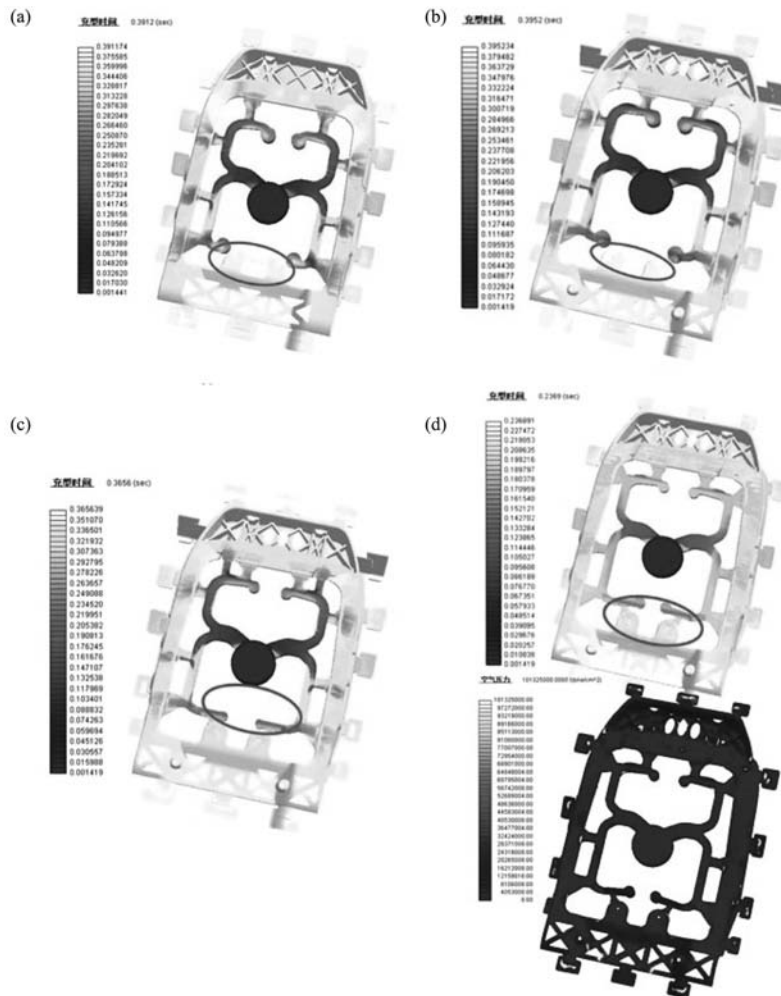
由图9的分析结果可见,工艺出品率在41.7%至49.8%之间,在工艺方案A-D的基础上设计的工艺方案E,随后经一系列优化设计和改进形成的工艺方案G的工艺出品率为49.8%,随后在此基础上进行细微调整的工艺方案H的工艺出品率为49.8%。

工艺方案H是经过一系列模拟分析的座椅靠背铸造工艺设计的最终方案,考虑到镁合金结构铸件目前平均的工艺出品率在50%(一汽铸造有限公司压铸厂镁合金方向盘),该工艺方案的49.8%的工艺出品率可以接受,因而最终确认该工艺方案。

3.4 产品调试与试制

镁合金座椅骨架铸造生产设备为配备有镁合金自动熔炼浇注炉的1 400 t压铸机。镁合金座椅靠背模具为一模一腔。模具模框和衬模均有加热油道,可以通过模温机对模具进行加热,加热油出口温度为230℃。镁合金熔体自动定量泵室温度为690℃。

图10示出了镁合金座椅靠背模具安装状态。模具分为动模和静模两个部分,在动模部分通过3个抽芯的方式分别形成靠背左右结构和头枕部位的结构。在试



(a) 方案A; (b) 方案D; (c) 方案E; (d) 方案H

图8 不同工艺方案充型时间和空气压力的模拟

Fig. 8 Simulation of mold filling time and air pressure under different process schemes

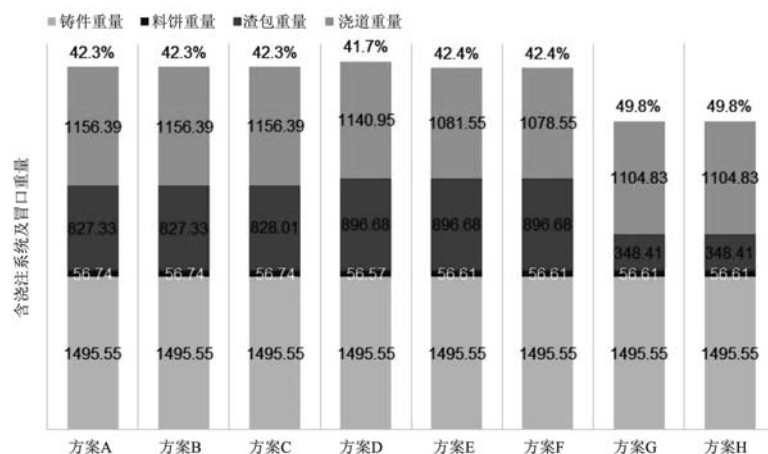


图9 座椅靠背铸造工艺出品率分析

Fig. 9 Technological yield analysis of seat back frame casting

制中采用的是搓衣板式排气波板,即普通压铸方式。

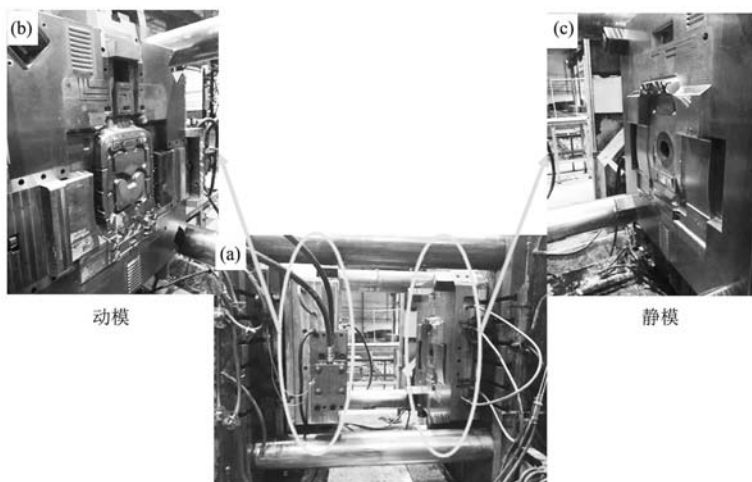
图11示出了镁合金座椅靠背铸件和铸件缺陷及其改进。在铸件试制过程中,铸件成形性良好,但在内

浇道之间区域因为金属熔体熔合后反向流动而导致明显的流痕,部分铸件出现了冷隔,如图11b中的椭圆区域所示,该缺陷为左右对称。为了改善上述缺陷,采

用风动工具在动模上手工加工出如方形区域所示的集渣包，以容纳来自两个浇口的金属熔体合并后熔体前端的冷金属，以避免产生流痕和冷隔。经过上述修改后，铸件缺陷消失，铸件质量满足要求。

3.5 碰撞测试

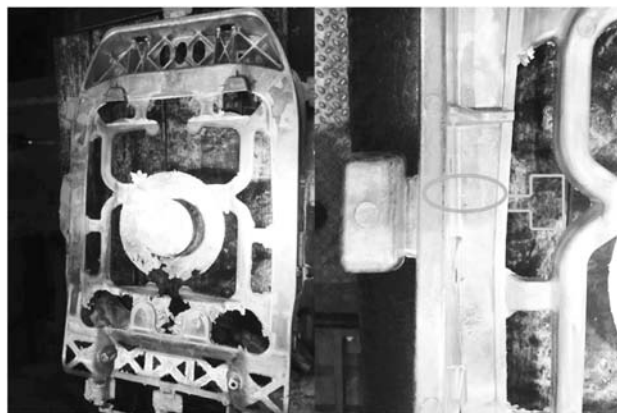
图12示出了完成整椅装配的镁合金座椅骨架总成。图13示出了完成整椅后试验的情况。铸件完成试制后，经过清理和加工后，送至合作方佛吉亚处总装为座椅骨架总成，并进行前后碰撞试验，目前按照奥



(a) 模具调试现场；(b) 动模；(c) 静模

图10 镁合金靠背调试模具

Fig. 10 Debugging mould of magnesium alloy seat back



(a) 座椅靠背铸件 (b) 铸件缺陷及其改进

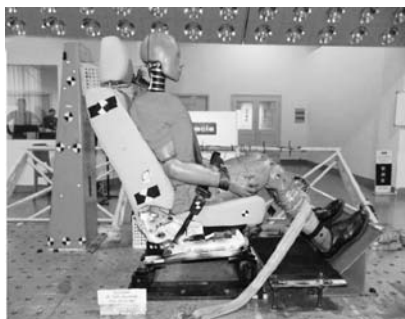
图11 靠背铸件调试

Fig. 11 Commissioning of seat back frame casting



图12 完成装配的镁合金座椅

Fig. 12 Magnesium alloy seat frame after assembly



(a) 测试前

(b) 测试结果

图13 镁合金座椅骨架后撞试验

Fig. 13 Rear impact test of the magnesium alloy automobile seat frame

迪Q3的前后碰撞曲线,已经通过了碰撞试验,证明了产品结构设计和工艺开发是可行的。

4 结束语

(1)通过设计、模拟和工艺的紧密结合实现了基于钢板冲焊部件的整体集成镁合金座椅骨架的结构优化和集成设计。

(2)通过采用铸造过程模拟分析技术优化铸造工艺,仅仅采用普通的真空压铸技术就满足了铸件的结构要求,显著简化了工艺过程。

(3)通过台架试验证实,采用集成镁合金铸件的座椅骨架完全可以满足碰撞要求,为集团整车轻量化提供一个完整的座椅解决方案。

参考文献:

- [1] 王帅. 汽车轻量化现状和发展趋势分析 [J]. 汽车使用技术, 2019 (11): 242-245.
- [2] 杨茂华. 浅谈整车重量控制与轻量化实现 [J]. 时代汽车, 2021 (12): 34-35.
- [3] 葛存啸, 黄键. 汽车座椅骨架的CAE分析及轻量化设计 [J]. 机电技术, 2020 (2): 103-106.
- [4] 李侃敏. 汽车座椅轻量化结构设计及成形工艺优化的探讨 [J]. 时代汽车, 2019 (1): 105-106.
- [5] 陈甜斌, 陈修艺, 王懿. 镁合金座椅骨架设计及性能研究 [J]. 汽车工艺与材料, 2020 (6): 53-56.
- [6] 李明, 杜徐徐. 新能源汽车座椅轻量化设计的探讨 [J]. 工业设计, 2020 (1): 153-154.
- [7] 张耀丹. 镁合金在汽车上的应用及发展前景 [J]. 汽车实用技术, 2015 (9): 165-167.
- [8] 杨天云. 汽车座椅轻量化结构设计及成形工艺优化 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012.
- [9] 韩洁丽. 镁合金汽车座椅骨架压铸成形数值模拟与工艺优化 [D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
- [10] 肖泽辉. 镁合金半固态流变压铸成形技术的研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- [11] 单巍巍. 半固态镁合金组织成分演变及流变特性分析 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2004.
- [12] 李明月. 压铸AM50镁合金汽车座椅骨架的设计及组织和性能研究 [D]. 长春: 长春工业大学, 2017.
- [13] 肖宇宁, 王斌. 汽车座椅骨架轻量化进展 [C]//2020年中国汽车工程学会年会论文集, 2020: 111-114.
- [14] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 铸造镁合金: GB/T 1177—2018 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.

Development and Application of Magnesium Alloy Seat Back for Passenger Cars

CUI Xiao-peng¹, ZHANG Yan-xin², LIU Hai-feng², LI Xin-lei², HAN Xing²

(1. Key Laboratory of Advanced Structural Materials, Ministry of Education, School of Materials Science and Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, Jilin, China; 2. CITIC Dicastal Co., Ltd., Qinhuangdao 066011, Hebei, China)

Abstract:

The steel plate stamping and welding seat back of a certain model was taken as the research object. Through lightweight design, the development of magnesium alloy seat back with integrated structure as the core was realized, and the trial production of the casting was completed by high-pressure casting process, and the weight reduction effect of the product reached 49.6%. The structural design, simulation and collision test showed that the magnesium alloy seat back can meet the use needs of the seat, greatly reduce the weight and generation cost, and meet the needs of vehicle lightweight.

Key words:

seat back; magnesium alloy; high pressure casting; collision test
