

• 特种铸造 Special Casting •  
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.08.015

# 高压高真空 2.8 m×2.0 m×1.6 m 车体结构件的 铸造模具研发及压铸生产

侯小华

(广东文灿模具有限公司, 广东 佛山 528241)

**摘要:**随着乘用车安全、节能和轻量化的需求日益增长。改用轻合金薄壁大型铸件,一方面可以取得显著的减重效果;另一方面可发挥铝合金良好的成型性能,将多个零件的复杂结构变为只使用一个零件,但必须研发和制造出高压高真空的压铸模具。结果表明,这不仅减少成型和连接环节,还可以缩短生产周期,达到成型尺寸近净化,减少机加工序,节约成本,满足节能环保要求。

**关键词:**高压高真空模具;薄壁大型铝合金压铸;车身结构件;节约成本

中图分类号: TG249

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2019)08-0819-06

## Research and Die Casting Production of High Pressure and High Vacuum Casting Mold for 2.8 m×2.0 m×1.6 m Car Body Structure Parts

HOU Xiaohua

(Guangdong Wencan Mould Co., Ltd., Foshan 528241, China)

**Abstract:** With the increasing demand for safety, energy saving and lightweight of passenger cars, the requirement of replacing with light alloy thin-walled large castings was increasingly strong. On the one hand, significant weight reduction effect can be achieved by using light alloy thin-walled large castings. On the other hand, it can give full play to the good forming performance of aluminum alloy and change the complex structure of multiple parts into using only one part. The results show that this can not only reduce the forming and connecting links, but also shorten the production cycle, achieve the forming size near purification, reduce machining sequence, save cost, meet the requirements of energy conservation and environmental protection.

**Key words:** high pressure and high vacuum die casting mould; thin-walled large aluminum alloy die casting; car body structure parts; cost saving

### 1 结构件的特征和要求

汽车结构件指的是汽车中的承载件或受力件,与汽车安全性紧密相关。在汽车车身中,许多结构件装在车身结构的节点上并与其他构件连接形成抗变形的高强度框架,是车身覆盖件、安全件的安装基础。这类结构件通常具有尺寸大、壁薄、结构复杂等特征。

常见的汽车车身结构件包括;车门、减震器上盖、纵梁、横梁、支柱、支架、轮罩、车顶拉梁等。结构多为封闭式的箱体截面。由于在行驶中要保证汽车可靠的安全性,对这类结构件的力学性能要求高。韧性相关的结构件,一般要求抗拉强度 $\geq$

180 MPa,伸长率 $\geq 10\%$ ;强度要求相关的结构件,一般要求抗拉强度 $\geq 210$  MPa,伸长率 $\geq 7\%$ ;为获得高性能,铸件往往需要热处理。通常需要与其他构件连接,还要良好的焊接性或铆接性。显然,常规的压铸工艺无法满足汽车结构件的生产,要求结构件的压铸生产需要新的工艺开发。

结构件的生产工艺主要涉及压铸机、压铸模具、模温控制系统、抽真空应用、合金材料、热处理、工艺优化等因素,其中真空压铸模具是其生产高性能车体结构件的关键因素。此类模具长期以来只有欧洲少数几个国家制造。

图1是某新能源轿车铝合金车身,红色部位是铝合金压铸结构件,我司为其提供十多个结构件的模具及压铸生产。其中后纵梁是连接车身和底盘的重要结构件,其压铸模具完全由我司自主开发、设计、制造。

图2是后纵梁模具,基本尺寸:长2.8 m,宽

收稿日期:2018-10-05

作者简介:侯小华(1976-),陕西勉县人,大专。主要从事模具设计方面的工作。电话:13690157285,  
E-mail:houxiaohua@wencan.com

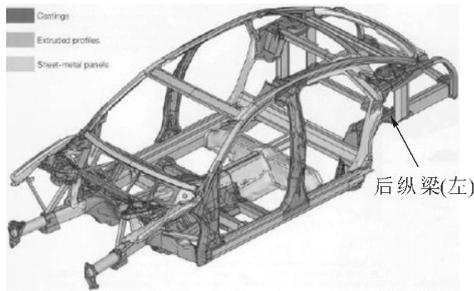


图1 轻合金车身  
Fig.1 Form of light alloy

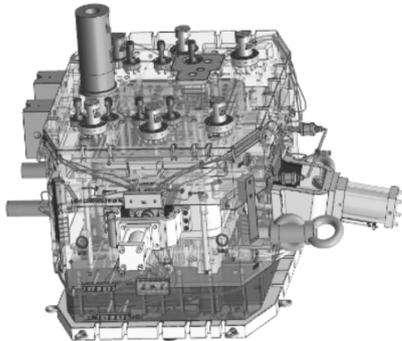


图2 汽车后纵梁压铸模具  
Fig.2 Die casting die for car rear rail

2 m, 压型厚度 1.6 m, 模具总重达 41 t。采用动定模共同顶出、整体压室系统、双真空阀、双回路超高真空模具结构。选用瑞士 BUHLER 3200 t 压铸机生产, 保证其产品达到客户要求。

## 2 产品及模具工艺设计

后纵梁模具项目开始, 我司设计团队与汽车生产商进行紧密有效的沟通合作, 以减重为主要目标, 对产品自身结构的工艺性展开分析, 产品最初三维尺寸长 1 350 mm, 宽 350 mm, 高度 510 mm, 重 23.5 kg, 绝大部分壁厚 5 mm, 壁厚不均匀。将复杂的结构通过铸造一体成型的全新设计。汽车厂技术指标要求: 屈服强度 180 MPa、抗拉强度 320 MPa、伸长率 10%。对于汽车后纵梁这样形状复杂的大型铸件, 如果采用重力或低压铸造, 因为充型速度有限, 熔液在金属型的快速冷却下, 在充填完成前即大量凝固, 从而造成浇不足或冷隔等缺陷。高压铸造, 是将铝液在大吨位的压机推动下完成充填, 然后在铸型中快速凝固, 获得细小的晶粒和较高的硬度, 生产效率高。我司工程师发挥在模具设计与铸造工艺方面的经验和优势, 通过数次的 CAE 等手段, 对产品相对较易产生内部缺陷的部位进行结构优化, 同时通过有限元受力分析, 在不影响性能要求的情况下进行减壁厚、减重、和增大拔模角度, 受力着重位置增加加强肋, 为防止铸件出模产生变形, 在动、定模两个方向增加顶出位和顶针。其

重控制在 17.2 kg, 平均壁厚控制 3.0~3.5 mm 达到模具制造和压铸技术条件。最终完成实际铸件。

模具设计注意以下几点:

(1) 首先要正确设计浇注系统, 合理选定浇注系统位置、充型方向以及各部分的尺寸, 保证良好的充型顺序和流态。

(2) 模具的排气口要设置在型腔最后充填的位置, 保证抽真空持续至充型结束, 此外, 在铸件的重要部位、液流汇合或容易产生紊流的部位也应设置排气口, 减小这些部位产生缺陷的可能性。

(3) 抽真空通道长度设计合适, 对排气道截面积进行仔细校核, 截面积变化符合气体流体力学原则, 保证排气畅通。

(4) 模具密封性影响真空的形成, 必须保证模具密封良好, 特别要减少顶出机构泄露。

(5) 仔细分析模具的热平衡, 合理设计冷却/加热管道, 这是生产中对模具温度进行有效控制的前提条件, 也是影响产品质量的关键因素。

(6) 通过 JSCAST-CAE 进行充型、凝固、温度场等方面的模拟验证(图 3), 获得压铸过程信息, 对模具结构及参数不断改进, 达到最优状态。

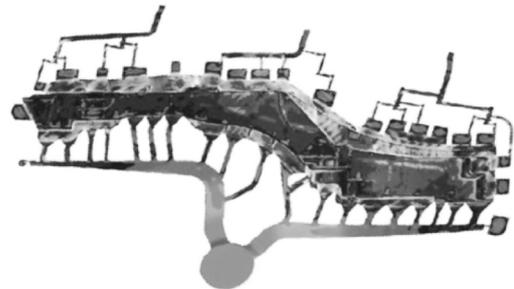


图3 CAE 模拟分析结果  
Fig.3 CAE simulation analysis results

(7) 真空阀选择合适, 要求排气顺畅、响应快速、安全可靠、易于清堵。

(8) 根据压铸模具铸造技术条件计算, 选用性能合适的压铸机及抽真空系统。保证模具参数与压铸机的匹配性, 提高一次试模成功。

## 3 模具制造

压铸模具的特点是: 产品结构复杂, 模具零件多且具有单一性, 加工材料硬度高、工序多、尺寸要求精度高。所用到的加工设备也非常多, 其中五轴联动加工中心对关键零部件的加工发挥着至关重要的作用。五轴联动加工中心也叫 5 轴加工中心。我司现有的 DMG 五轴加工中心(图 4), 由德国生产, 具有科技含量高、5 轴联动、自动换刀、自动对刀、自动分中、自动检测、主轴高转速, 超强、超高精度铣削的能



图 4 五轴加工中心机床

Fig.4 Five-axis machining center machine tool

力,专门用于复杂曲面的加工。

五轴联动加工的特点;

(1)可避免刀具干涉,加工普通 3 轴或 4 轴机床难以加工的复杂零件,加工适应性广。如图 5(a)。

(2)对于直纹面类零件,可采用侧铣方式一刀成型,加工质量好,效率高。如图 5(b)。

(3)对一般立体型面特别是较为平坦的大型表面,可用大直径端铣刀端面逼近表面进行加工,走刀次数少,残余高度小,可大大提高效率与表面质量。如图 5(c)。

(4)对工件上的多个空间表面可一次装夹进行多面,多工序加工。加工效率高并有利于提高各表面的相互位置精度。如图 5(d)。

(5)5 轴加工时,刀具相对于工件表面可处于最有效的切削状态。如图 5(e)。

(6)在某些加工场合,可采用较大尺寸的刀具避开干涉,刀具刚性好,有利于提高加工效率与精度。如图 5(f)。

### 4 真空压铸工艺过程

高效智能压铸岛的应用就是以实时控制压铸机为核心,通过嵌入式控制器对压铸机及周边设备包括定量炉、喷雾机器人、取件机器人、模冷机、模温机、高压点冷机、抽真空机、切边机,进行智能控制,是确保大型薄壁车体结构件模具顺利生产的关键,如图 6。

(1)压铸机 我司 3 200 t 压铸机是瑞士BUHLER 公司生产全球最先进的。其主要特点是:压射速度和增压压力完美地与模具相适应,形成一个节约模具的压射过程。在充填阶段结束时压力峰值的消除使飞边缺陷降低,尤其是对于一些复杂的带有多个抽芯的模具,清理和维修的成本大大减少。模具寿命得到极大提高,使分到每个铸件的折旧费降低,提高了整个生产的效率。

对压射速度、压射压力等重要参数进行实时监控、参数误差监控。在每次压射过程完成后,如参数合格,铸件将被自动标识;如超出控制限制,铸件则被判断为不合格件,同时压铸机发出 NG 信号给取件机器人对不合格件做出隔离处置。

机器设定和生产过程优化快速简单,能够准确地提供全部生产所需数据。提供直观的图形列表,达到人机界面不受语言限制。压射曲线具有自我诊断和分析能力。充填测试、生产数据可存贮到硬盘或软盘,还能实现远程控制。对操作人员导引式进行生产编程和参数设定、多级警告,所有编程和警告活动按时间列表记录。温度监控系统包括对液压油、润滑

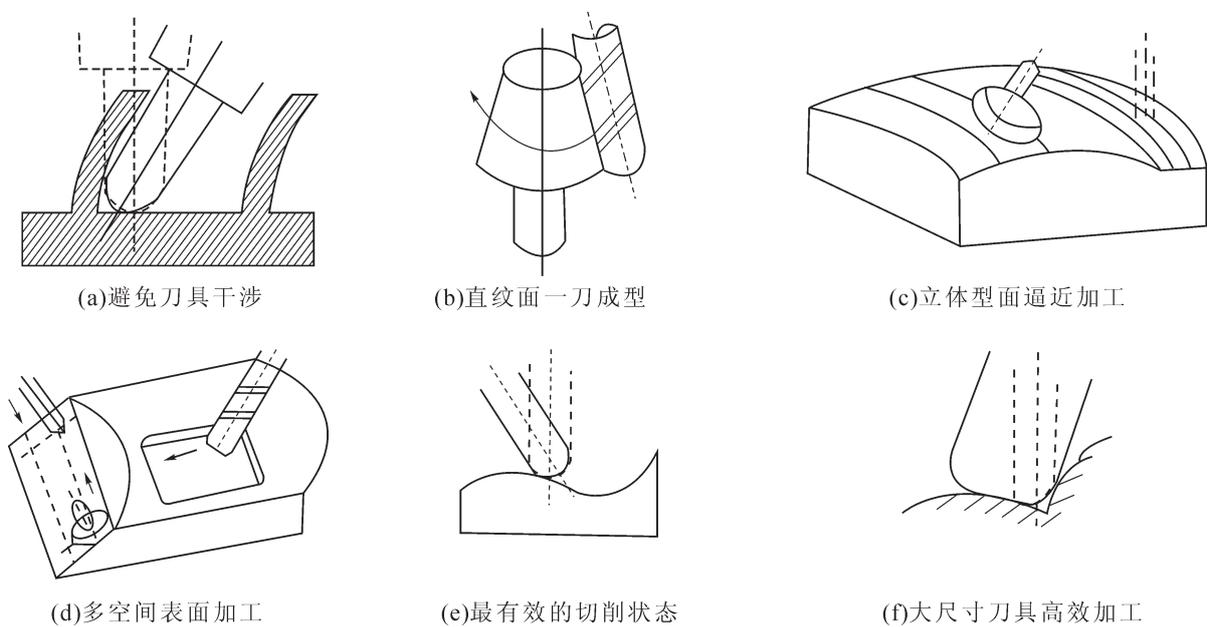


图 5 五轴加工特点

Fig.5 Features of five-axis machining

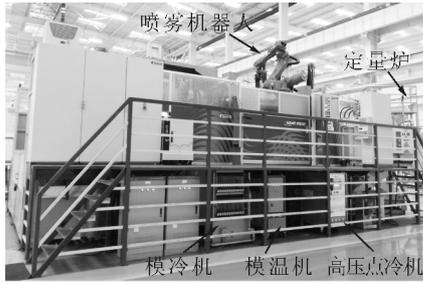
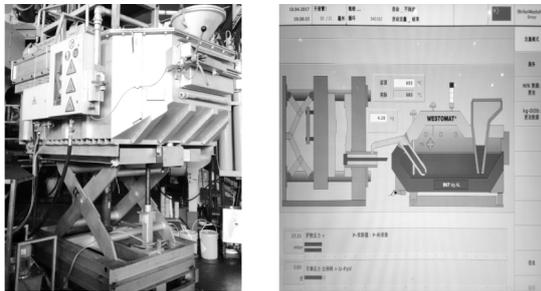


图 6 压铸岛

Fig.6 Die casting production line

油等的自动监控。自动生成维护日程表、使故障排除简单容易。保证设备正常高效运转,可实现无人化操作。

(2)标准定量炉 史杰克西(StrikoWestofen)定量炉是德国生产,具有极高的能源利用效率,最小的金属烧损,最小的二氧化碳排放,同时做到精准给液,如图 7。



(a)Striko Westofen定量炉 (b)定量炉控制示意图

图 7 定量炉

Fig.7 Quantitative furnace

传统的顶部液勺给液方式容易产生金属液之间的冲击、溅液、氧化和卷气,造成铸件基本组织缺陷,降低塑性。而定量炉从底部给液方式减少了合金液的扰动及热损失,做到温度精准控制在 $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$ ,降低了合金液产生浮渣微粒以及卷气的可能性,因而铸件基体杂质和缺陷减少,有利于提高铸件质量。同时优化给液管长度,给液管加热,做到与压室和模具科学连接,将定量炉性能发挥到最佳。

(3)铝合金材料 由于车体后纵梁对塑性要



(a)抽真空设备

求高,传统的标准压铸合金不能满足其性能要求。我司工程团队根据后纵梁使用要求,通过标准试片反复验证,为其自主研发的一铝合金,其成分保持了一般结构件以硅元素为主(硅含量取 $8\%\sim 12\%$ ,在真空压铸条件下此含量的铸造性能和强度都较好),但进行了以下改良创新;①铜元素降低了塑性,改为以镁元素为主要强化元素,通过热处理获得所需力学性能;②通过添加锆元素,对硅相形态进行先期的改善;③通过添加较多含量的锰元素,以减少含铁脆性相对力学性能的影响。

(4)智能抽真空机 真空模具与抽真空机(图8)有效地联系,才是是否能达到真空状态的关键。将压铸模具抽为真空,就可以显著减少充型时裹入的气体。这样后期对零件进行热处理,可不发生鼓包问题。这样零件除保留了压铸件固有的优点外,还可以适用铆接、焊接等灵活的连接方式。满足零件高塑性、高韧性等的受载要求。

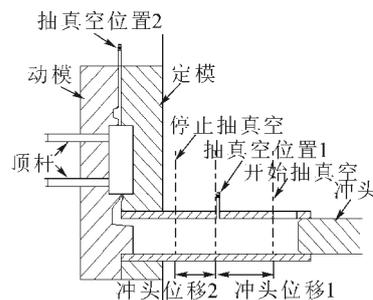
明显,真空充型是结构件压铸的重要工艺措施。高真空还可以增大压铸工艺窗,使压铸工艺选择范围较大。真空度对铸件的质量也有明显影响,铸件的表面质量随真空度提高而改善。

采用真空工艺应注意以下几点:①真空系统功率足够,抽真空快速;②压室充满前必须达到要求的真空度,否则影响效果;③抽空结束,能够及时快速关闭真空阀,防止由于阀芯关闭不及时铝液堵塞阀体;④生产过程中定期对模具分型面及真空阀进行清理及维护保养。

(5)油式模温机 模具的温度对铸件的质量和压铸时间起着决定性作用。

油式模温机的优点是控温范围大最高温度可达 $300\text{ }^\circ\text{C}$ ,热精准性好。通常通过预设计在模具内部的加热通道或加热井,能够快速加热或冷却模具,并保持它的工作温度。可以减少模具预热时间,提高模具寿命,提高生产力。

应用模温机的优势;①提高产品的成型效率;



(b)抽真空工艺

图 8 抽真空系统  
Fig.8 Vacuum system

②降低不良品的产生;③提高产品外观质量,抑制产品内部缺陷;④加快生产进度,降低能耗,节约能源。

(6)高压点冷机 在压铸生产中,当铝液注入模具型腔内,会在极短的时间内释放出大量的热量,促使模具局部温度瞬间升高,模具温度的不均匀和不适当,直接影响铝液充型过程及铸件在模具型腔内的凝固时间,从而影响产品质量和模具寿命。因此,铸造质量、铸造生产率、模具寿命在很大程度上取决于对模具热控制能力。

高压点冷机的应用,模具水冷却系统与压铸机联动,按要求的压力和时间供应冷却水给模具的冷却系统以满足铸造过程工艺要求,来改善铸件的质量及提高生产效率。为了保证生产的稳定性,系统能够实时监控机器的工作状况,当铸造温度超出设定条件时,发出报警信号,提示有异常产生,同时还能将异常信号传递给主机的报警系统。使主机也能采取相应的自我修正措施。

高压点冷机的工作原理,是当冷却水控制系统接收到工作指令后,经过一段时间的延时,供出冷却水到模具内部的冷却管道或冷却井,通过冷却水将压模具的热量带走,供水完成后吹出空气,清干模具冷却管道中的存水;通过冷却水流量来控制压铸模具温度。使压铸模具温度保持在正确范围,以保证压铸件的质量。

使用高压点冷机冷却时应注意以下几点:①冷却水温度不宜低于 30 ℃,以免因激冷而引起压铸模具过早开裂;②冷却水最好使用软水,使用硬水冷却易在水路上形成水垢;③冷却通道不能有渗漏和堵塞现象发生。

(7)机器人喷雾机 喷涂的目的主要是保护模具表面和冷却模具热节,当经雾化后的脱模剂接触到模具型腔表面后,水分迅速蒸发,留下极微薄的脱模剂薄膜,避免金属液与压铸模具型腔表面粘接还有一定的润滑能力,使压铸件容易从压铸模具中脱出,为压铸提供稳定而快速的生产效率。但是脱模剂会产生气体进入铸件,增加铸件中的含气量。在采用真空工艺时,脱模剂的挥发则是铸件中气体的重要来源。所以不但要选用发气性低和挥发性好的脱模剂,还需要先进的雾化、喷涂设备。

手动或伺服喷涂,由于动作不规范、不灵活,适应性差,容易出现喷涂动作的随意性,对喷涂距离、喷涂速度、喷涂角度、喷涂量、喷涂时间、稀释比例不能精准控制,而造成压铸件质量不稳定情况发生。

我司选用的 ABB 机器人喷涂设备,具备高动态特性,喷涂参数可调。雾化效果好,喷雾均匀,各喷点定位精确,机械强度高,稳定性好,使用寿命长,喷雾效率高,这样就能尽量减少喷涂量,保证快速喷涂和精确喷涂。产品不会产生水纹或拉花现象,有效克服喷雾死角,更适合长期、稳定的工作。

在结构件压铸生产中,模具的整体温度控制尽可能由模具内部的加热/冷却管道完成。对于个别部分如分流锥、横浇道和型芯等处可适当缩短喷涂距离。要对喷涂时间、喷涂角度和范围等因素进行不断优化,使进入铸件的气体最少。保证产品高质高质量的产出。

(8)机器人取件机 在压铸过程中,存在高温、高粉尘、振动、油污、噪音及电磁干扰,且一般作业空间狭小,环境比较恶劣。若依靠人工或普通机械取件不仅耗费体力而且动作稳定性差,生产效率低下。特别对于大吨位、铸件尺寸大的产品压铸,尤其对于难度大的镶嵌工艺压铸。普通机械取件手已不能满足较复杂的自动化要求,更是显得无能为力。

我司开发的后纵梁模具,铸件重达到 26.5 kg,铸件长度达到 1.3 m。只有采用专用 ABB 智能机器人取件机(图 9)进行取件操作,才能实现智能生产,绿色铸造的现代化要求。该机器人对铸件检测、冷却、切边、输送等复杂的工艺要求能够一气呵成,节省大量人工成本。且动作流畅灵活,精准稳定,故障率低。同时 ABB 机器人取件机还具有足够的动作自由度及编程的便利性,更换生产产品时直接调用预存、预设程序,操作简单。可以连续不断地运行且避免决策失误及信息判断失误等因素造成的质量问题,有效保证了更高的生产效率和可靠的生产周期。ABB 智能机器人取件系统在我司大量的成熟广泛使用,标志着我司在智能生产、绿色铸造方面已走在压铸行业前列。



图 9 工业机器人  
Fig.9 Industrial robot

## 5 铸件验证及热处理制度

铸造铝合金的热处理,是通过固溶和时效过程

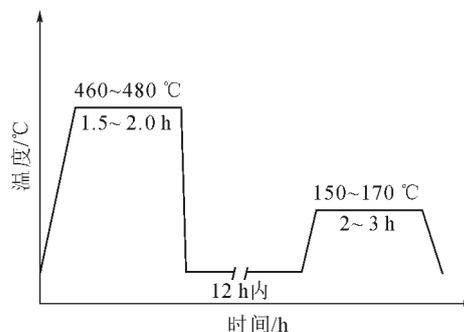


图 10 热处理炉  
Fig.10 Heat treatment furnace

来改变铸件的金相组织,控制强化相的形态、大小、分布和数量,使硅相颗粒更圆润,以获得期望的材料性能的方法。

后纵梁铸件虽然成功压铸,但还是需要对铸件进行气泡实验和热处理才能进一步提高性能,特别是材料塑性,以达到断后伸长率设计指标。

首先需要设计后纵梁热处理的专用固定安装架简称热处理挂架(图 10),使产品能有效固定在挂架上。因为铸件在热处理过程中近乎接近半固溶状态,这样产品不但达到热处理提高材料性能的目的,还能防止铸件变形,特别是像后纵梁这样的大型薄壁车体结构件。

## 6 结语

该项目产品对抗拉强度、屈服强度、伸长率的要求均达到国际高端汽车车体结构件的领先水平。不但提升了公司模具开发整体技术能力,加强了企业在压铸行业的竞争力,而且是对传统压铸工艺的一次重大突破,对于乘用车轻量化结构设计,使用轻金属铸件代替传统钢架结构也给予了很有价值的借鉴。

此项目的巨大成功填补了中国在该领域的空白,为促进中国汽车高端压铸件制造技术奠定了良好的基础,也是文灿公司在汽车铸铝零部件高端技术产品量产方面始终站在国内行业的最高点,成为中国第一家且目前是唯一一家实现车体结构件量产的企业,并已销往(美国)特斯拉、奔驰汽车。为我司及中国汽车模具走向世界前列增光添彩。

该项目的成功开发也使项目所有参与者和公司决策者深刻的意识到,随着全球模具应用领域的不断扩大,特别对汽车压铸模具从安全、性能、环保方面提出的更多和更高要求,我们只有始终拥有持之以恒的热情与追求,发扬精益求精、一丝不苟的工匠精神才能造出世界最好模具。

### 参考文献:

- [1] 潘宪曾主编. 压铸模设计手册[M]. 北京:机械工业出版社,1999.
- [2] 罗启全. 铝合金熔炼与铸造 [M]. 广州:广东科技出版社,2002.
- [3] 吴春苗. 压铸实用技术[M]. 广州:广东科技出版社,2003.
- [4] 周家荣. 铝合金熔铸生产技术问答[M]. 北京:冶金工业出版社,2007.
- [5] 刘战强. 先进切削加工技术及应用[M]. 北京:机械工业出版社,2006.

## 《铸件均衡凝固技术及应用实例》

《铸件均衡凝固技术及应用实例》由西安理工大学魏兵教授编著。共 8 章:1、铸铁件均衡凝固与有限补缩;2、铸铁件冒口补缩设计及应用;3、压边浇冒口系统;4、浇注系统大孔出流理论与设计;5、铸件均衡凝固工艺;6、铸钢、白口铸铁、铝、铜合金铸件的均衡凝固工艺;7、浇注系统当冒口补缩设计方法;8、铸件填充与补缩工艺定量设计实例。全书 320 页,特快专递邮购价 226 元。

邮购咨询:李巧凤 029-83222071,技术咨询:13609155628