

浅析一体化压铸技术的关键生产要素

于德水¹，何廷余²，刘清¹，李东洋¹，高杰³，韩星⁴

- 1. 苏州亚德林股份有限公司 江苏苏州 215200
- 2. 东莞市平泽五金制品有限公司 广东东莞 523000
- 3. 比亚迪股份有限公司 广东深圳 518122
- 4. 山东宏桥轻量化科技有限公司 山东滨州 256200

摘要：简要介绍了一体化压铸概念及其特点，并引出其对行业的“量变到质变”的影响。详细介绍分析了一体化压铸在压铸材料、压铸工艺、压铸设备、配套设备、检测方法和技术人员等几大生产要素上的要求，最后指出一体化压铸技术的推广应用，需要汽车、设备、压铸、模具、材料及科研等多板块、全链条协同合作，助力于一体化压铸的软着陆。

关键词：一体化压铸技术；生产要素；量变质变；协同合作
DOI:10.16173/j.cnki.ame.2024.08.011

2019年7月，特斯拉发布新专利——“汽车车架的多向车身一体成型铸造机和相关铸造方法”，提出了一种车架一体铸造技术和相关的铸造机器设计。2020年9月22日的特斯拉电池日发布会上，马斯克称特斯拉Model Y将采用一体压铸生产车身后底板总成，替代了原本需要70多个零部件经1000多次焊接而成的冲焊工艺，特斯拉官方表示，这种技术将使下车体总成质量降低30%，制造成本下降40%，为Model Y整车省下20%的成本，并减少30%的工厂占地面积。同时特斯拉计划用3个大型压铸件拼接成整个下车体总成，替换掉原来的370个零件，最终可以实现汽车整备质量降低10%，续航里程增加14%。特斯拉引领了整个行业的追随与变革，蔚来、小鹏及高合等主机厂及压铸相关

厂商正在进行从0到1的验证工作和从1到100的发展工作，沃尔沃、大众、奔驰及一汽等传统主机厂也在积极布局。

上述技术即为“一体化压铸技术”，是将原本设计中需要组装的数十个甚至上百个零件经重新设计、高度集成，利用超大吨位压铸机，通过先进压铸工艺，一体成形为一个超大尺寸的铝制部件，实现原有功能。该技术最突出的特点是超大尺寸的产品，进而引出超大吨位压铸机、超大复杂结构模具、极限工艺参数和极高CAE分析要求，同时解决大尺寸薄壁件变形问题的“杀手锏”——免热处理铝合金成为了一体化压铸技术的热点之一。

本文结合传统压铸技术，就一体化压铸技术的生

产要素，即“人、机、料、法、环、测”，逐一进行详细地介绍和分析。

材料性能

一体化压铸的零件，通常具有尺寸大、壁厚薄以及结构复杂等特点，这就对铝合金材料性能提出了更高的要求。综合考虑使用性能、工艺特点及生产条件等因素，一体化压铸铝合金材料不仅在常规性能上比普通压铸要求高，而且还有其独特的要求。

1. 常规性能要求

(1) 热塑性流变性能良好 在过热度不高于液、固相线温度附近应具有良好的热塑性流变性能，以实现复杂型腔的填充，形成良好的铸造表面，避免缩孔缺陷的产生。

(2) 较小的线收缩率 以避免压铸过程产生裂纹和变形，使铸件保持较高的尺寸精度。

(3) 较小的凝固温度区间 以便于实现快速同时凝固，减少内部收缩孔洞等缺陷。

(4) 较好的铸件（铸型）界面性能 与压铸模具不发生化学反，亲和力小，以减少粘模和相互合金化。

2. 独特性能要求

(1) 高强韧性 对于传统铝合金而言，热处理是保障零部件力学性能的必备手段，但实际上，热处理过程易引起零部件表面缺陷和尺寸变形，这对于大型一体化零部件来说将不可避免地造成废品率的增加，承担巨大的成本风险。因此需要特殊的免热处理铝合金，在不需要进行热处理的条件下，保证材料成型后依然具有良好的力学性能。根据材料的强度进行零件的结构设计，并且材料强度越高、减重越明显。另外对于车身结构件来讲，还需兼顾碰撞、疲劳性能要求等，因此一体化压铸结构件要求材料在铸态下具有高的强度和塑性。

(2) 优异的铸造性能 铸造性能包括很多方面，对于一体化压铸结构件来说，材料的充型能力很关键。目前最远的流程可以达到2.7m左右，如果充型能力不足，将导致欠铸等问题。

(3) 连接包容性高 因为大型的一体化压铸车身

结构件在零件的不同部位无法做到性能统一，所以在零件的不同部位可能会选择不同的连接方式。例如：焊接、SPR及胶接等。

不同的连接方式对于材料的性能要求也不一致，例如SPR就需要材料具有较高的韧性，而焊接则要求材料不应存在气孔等要求。

(4) 微量元素、杂质元素的容忍度更高 目前，一体化铸件的成品率在60%左右（各企业的数据不一致，此数据为大致的平均水平），这意味着大概有40%的零件需要回炉重新使用，在这个过程中难免会引入一些杂质元素，另外有些元素还会存在烧损。随着双碳目标的确定，未来希望再生料能够融入免热处理生产的过程中。因此，材料能够对元素及杂质拥有高的容忍度，才能确保经济性和铸件性能。

(5) 长效高效的变质剂 因为免热处理材料的特性就是取消了热处理工序。目前常用的AlSi10MnMg材料，通过热处理来改善零件的力学性能。而免热处理材料没有了后续手段，只能通过铸造过程中形成的组织来实现力学性能。通过控制凝固过程中形成的组织来实现材料的强度和塑性。目前对于免热处理材料组织的控制，关键点在于共晶组织的控制。铝硅系合金着重控制共晶硅的形貌和尺寸；铝镁硅系合金着重控制镁二硅的形貌和尺寸。目前依靠现有的镧（La）元素、钆（Gd）元素或者稀土元素作为变质剂进行组织调控。在实际生产过程中，工艺上需要熔体有很长的时间的保温，如果变质剂效力下降乃至失效，将对于生产的连续性存在极大的挑战。

因此，目前免热处理铝合金成为目前一体化压铸产品的唯一选择。各大高校、科研院所、企事业单位纷纷开发对免热处理材料，呈现百花齐放态势。目前来看，免热处理铝合金可分为铝硅系（Al-Si系）和铝镁系（Al-Mg系）两大类，各个牌号在此框架下进行成分调整和工艺路线制定。目前成熟的免热处理材料往往拥有一个免热处理合金牌号体系，如美国铝业、莱茵菲尔德、特斯拉以及上海交大等。

通过梳理各个免热处理铝合金材料牌号成分，可以发现一些材料是在已有专利的基础上进行成分微调、生产工艺调整，成功研发免热处理铝合金材料的企业都会尽快申请专利进行保护；整车厂为避免专利纠纷，会选择具有专利保护的合金牌号，专利是进行

整车前期试验和认证的门槛。研发和认证壁垒——虽然免热处理合金研发不存在高不可攀的技术门槛，但需要上游材料企业、压铸厂、模具厂与整车厂合作研发。研发壁垒不仅在于合金成分调整和工艺路线调整，关键是材料生产商与压铸厂、整车厂绑定合作，不断试错，生产出符合整车性能要求的材料。

工艺流程

一体化压铸技术改变传统车身生产流程（先生产结构件后焊接组装），可大幅减少焊接、涂胶环节，极大简化了车身整体生产流程。一体化压铸件主要包括熔化、压铸、打磨、X光及机加工机装配等工序，其生产工艺流程如图1所示，与减振塔、纵梁等车身结构件相比，省略了热处理（矫形）工序，本小节重点介绍压铸工序。

一体化压铸件包含了整车左右侧的后轮罩内板、后纵梁、地板连接板以及梁内加强板等零件，比普通压铸件体积更大、形状更复杂，型面、截面以及料厚的变化都更加剧烈。对压铸工艺也提出更高的要求：工艺上的流态、压射比压与速度等参数的控制更加严格，对设备的精准与阈值、模具的抵抗冲击变形能力要求更为苛刻。

一体化压铸工艺流程为：喷涂、合模、浇注、压射、保压、开模、取件、完整性检查、冷却、切边以及传送带。

压铸工艺参数主要包括压力、速度、时间、温度以及真空等。铸造压力，气密性产品80MPa，一般产品60MPa，一体化压铸产品都在40MPa以下，原因在于压力太大，锁模力不足，导致飞料严重；压铸机

空压射速度一般要求10m/s以上，实际冲头最高速度为6~8m/s，内浇口速度为40~55m/s；充型时间50~80ms；温度，铝液温度为700~710℃，模具温度220~280℃，一体化压铸对模具热平衡要求很高；真空度30~50mbar（1bar=10⁵Pa），实际上能低于30mbar。

另外，由于预结晶组织会显著削弱一体化压铸件的机械性能，因此铝合金浇注过程非常关键，一般通过熔杯铝液温度、料筒加热及压铸工艺等工艺对预结晶进行管控。

基础硬件

一体压铸结构件尺寸和质量持续提升，压铸机吨位突破新高，一体化压铸技术采用6000t以上的压铸主机，目前已完成安装调试的压铸机吨位有6000t、6100t、6600t、6800t、7200t、8800t、9000t以及12 000t，另外16 000t压铸机已经进入制造阶段，20 000t压铸机进入开发阶段。

1. 压铸机

压铸机是一种在压力作用下把熔融金属液压射到模具中冷却成型，开模后得到固体金属铸件的工业铸造机械，以标准化机器为主，通过安装不同压铸模具实现多种零部件产品的生产。根据行业经验，一般按照压铸件的轮廓、尺寸和质量，选择不同吨位的压铸机。根据布勒中国，传统车身结构件所需压铸机吨位长期保持在1600~4400t范围内，其中前减震塔要求1600~2500t，而前后门框、尾盖箱、后纵梁、A柱要求4000t，车门要求4400t。随着一体压铸结构件的尺寸和质量不断提高，对压铸机吨位的要求也随之提高，

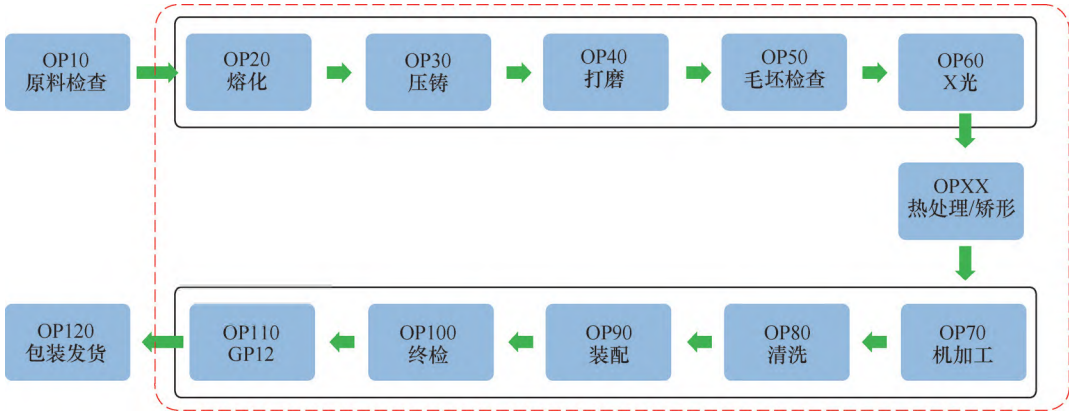


图1 一体化压铸工艺流程

如图2所示，中型SUV Model Y的后地板和前舱使用6000t压铸机；B级轿跑蔚来ET5的半片式后地板使用6000t压铸机；而尺寸更大的电动皮卡Cybertruck的后地板（或前地板）将使用8000~9000t压铸机；电池包、A00级下车体等，则需要12000t及以上吨位压铸机。

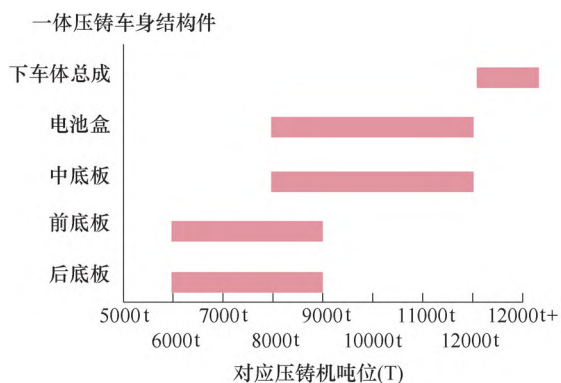


图2 不同产品对应的压铸机吨位

超大型压铸机研发和生产存在难度，超大型铸造机的制造难度主要体现在研发和生产两个方面。

在研发方面，目前大量应用的汽车铝压铸结构件已具备尺寸大（500~1500mm）、壁薄（2.5mm左右）、结构复杂等特征，将传统铝压铸结构件和高度集成化的一体压铸结构件作对比，一体压铸结构件的形状更加复杂，壁厚不均，尺寸和质量明显增大，这对超大型压铸机的锁模力、容模空间尺寸、压射力、最大空压射速度、安全性及可靠性的设计能力提出较高要求。之前压铸机厂商仅有5000t以下的压铸机研发经验，面对超大型压铸机6000t→7000t→8000t→9000t→12 000t→16 000t→20 000t的吨位增长，压铸机厂研发曲线非常陡峭。

在生产方面，超大型压铸机从研发到交付的时间跨度较长，压铸机厂需要持续投入高额资金，这在一定程度上考验压铸机厂的生产能力。国内压铸机厂率先布局，力劲集团订单量遥遥领先。国内压铸机厂商在研发进度、交付速度和订单量上全面领先，代表公司为力劲股份、伊之密及海天金属。其中，力劲集团早于2019年11月交付首套6000t大型压铸单元，成功成为特斯拉全球供应商，之后获得特斯拉30套超大型压铸机订单。在这之后，力劲集团持续获得国内各压铸厂的超大型一体压铸订单，其压铸机交付吨位不断突

破新高。国外压铸机厂则进度较慢，2022年6月才正式向客户交付6100t压铸机。

2. 压铸模具

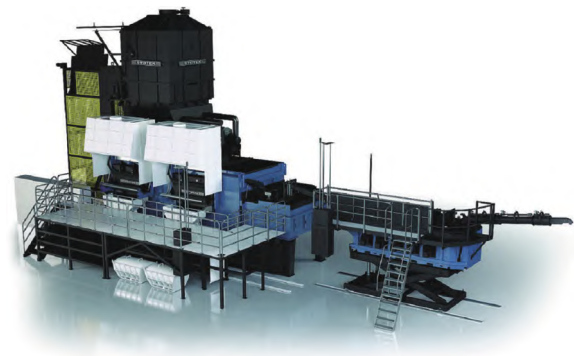
压铸模具也是压铸生产的核心设备之一，一体化压铸对大型压铸模具设计提出更高要求。一体化压铸模具尺寸更大，传统压铸模具的产品尺寸在1m以内，一体化压铸产品尺寸达到1.6~2m，对应模具的尺寸需要达到3m以上，导致加工难度提升，一体化压铸模具的质量达到150t或更大。超真空压铸环境，一体化压铸对模具的密封性要求高，需要达到的真空环境低于30MPa，由于模具的零部件数量多，对密封圈等要求较高；开发周期长，开发成本更高，超大型压铸模具的开发周期在150~180天，传统压铸模具的成本不超过400万元，超大型压铸模具的成本普遍在千万元以上。模具的定制化程度高，一般都是采用私人订制的方式接受订单，需要根据不同车型进行设计，要求模具厂与整车厂、压铸厂持续沟通，设计、打样、改进优化及投入使用的生产周期较长，设计方案复用水平较低，一般第二款模具就需要重新进行开发；材料性能要求高，由于大型压铸机的压射速度更快，导致模具需要承受的压力更大，其次对材料的回火性能、韧性、热膨胀系数要求高，以及表面处理等技术都是难点。

配套设备

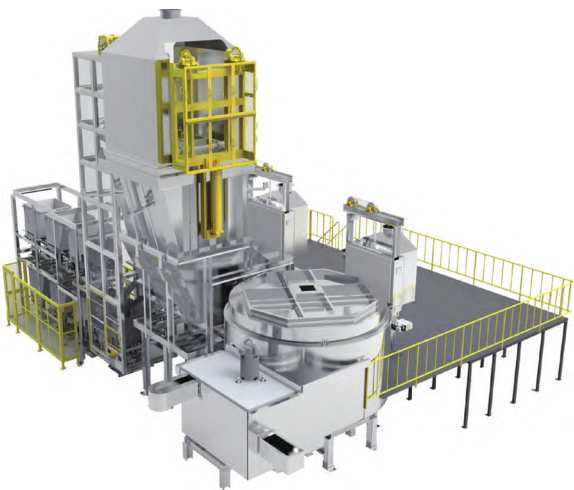
除了压铸机和压铸模具，压铸生产所涉及的其他设备称之为配套设备。主要包括周边设备、熔化设备、热处理及后处理等设备，其中后处理又包括机加工、表面处理及装配等。周边设备与压铸机和压铸模具共同组成压铸单元，周边设备包含机边炉、喷涂系统及喷涂机器人、取件机器人、真空系统、完整性检查、冷却水槽、去渣包、切边机、打码机、传送带、模温机、冷却站、热成像仪及除尘罩等超过二十套设备；熔化设备包括集中熔化炉、转运包、定量炉、保温炉以及除气机等；后处理包括机加工、去毛刺、表面处理以及装配等设备。以上设备中，一体化压铸技术与传统压铸技术所不同的在于机边炉、喷涂系统、热成像仪、切边装备及机加工设备。

1. 机边炉

机边炉分为两种方式：定量炉和保温炉+给汤机，一般两者旁边均配备专用集中熔化炉。定量炉的特征为大型全密闭定量系统，全密闭流槽采用封闭式设计，使铝液在给汤过程中不再接触空气且给汤时间显著降低，大型一体化压铸件需要配备4~8t定量炉，单泵/双泵给汤量150/200kg，定量速度10kg/s，定量精度±1%。另外，定量炉又分为一体式密封气压定量保温炉、分体式敞口气压定量保温炉和分体式敞口真空定量保温炉三种。相对而言，保温炉+给汤机在工作效率、能耗、烧损及给汤时间方面存在劣势，但设备投资较低。目前，两种机边炉类型均有应用，如图3所示。



a) 定量炉

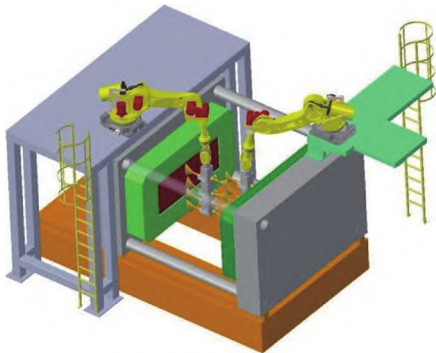


b) 保温炉+给汤机
图3 机边炉类型

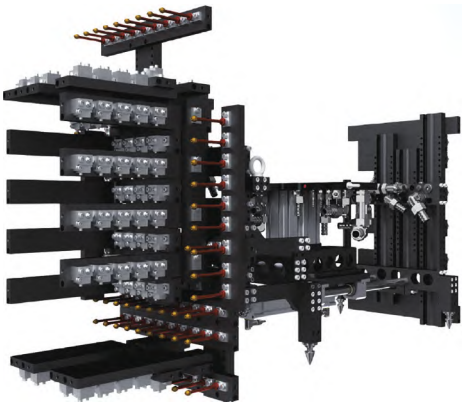
2. 喷涂系统

大部分采用微喷涂或静电喷涂技术，采用脉冲喷

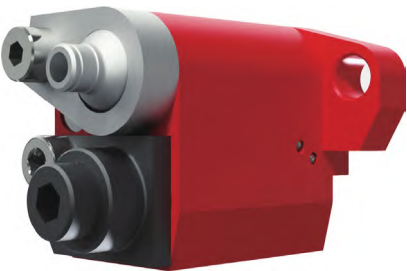
涂工艺，配备仿形喷头和多喷涂装置，如图4所示。喷涂是循环时间的消耗大户，传统的喷涂方式严重影响大型零部件的生产效率。采用动定模各一组或单侧双喷涂的设计，尽量减少安装和维护区域，避免更多的机械干涉。技术方案上可选择微量喷涂或静电喷涂技术，最大程度地节省循环时间，提高生产效率，但这也对模具热平衡的控制提出了更高的要求。



a) 多喷涂装置



b) 仿形喷头



c) 微量喷涂喷嘴
图4 喷涂系统类型

3. 热成像仪

如图5所示，一体化压铸基本均配备模温实时在线

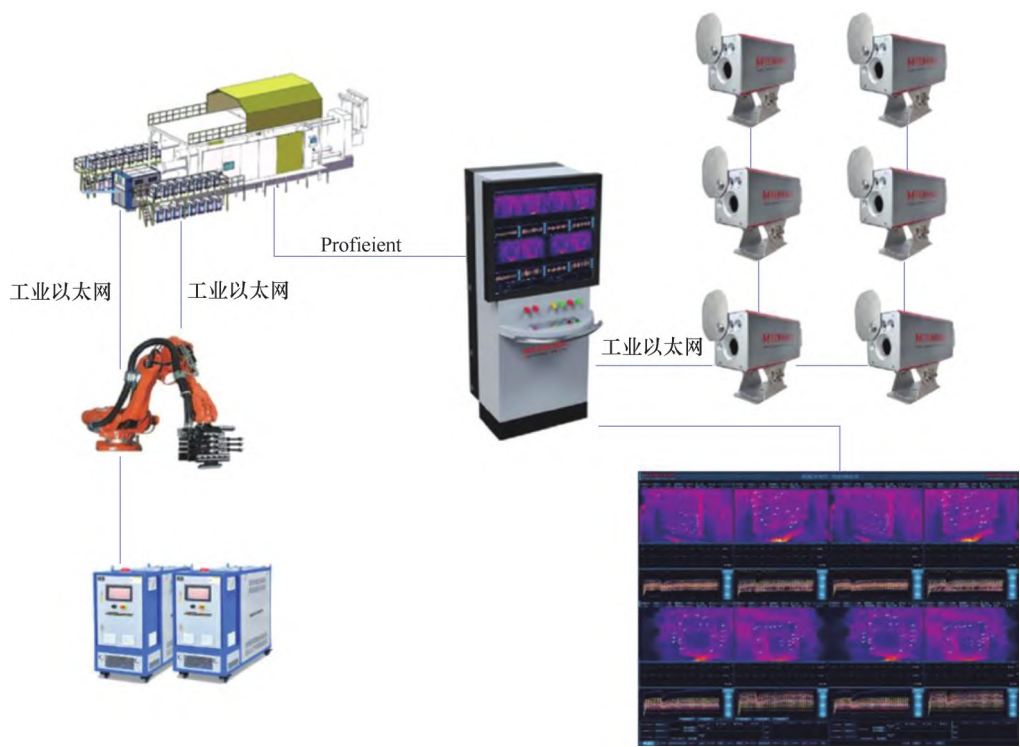


图5 模温实时在线监测系统

监测系统包括红外热成像相机、监控系统、温度采集分析软件等，与模温机、点冷机和喷涂机器人共同调整、控制模具温度。

在压铸生产过程中，模温实时在线监测系统与压铸机控制系统对接，并且还可以与喷涂机器人、模温机、点冷机等其他周边设备通信使其完成闭环控制。监测系统能准确、快速地在模具开模完成和喷涂前后两个阶段，对模具表面温度进行采集、记录、分析以及与设定数值对比，并完成相应的评估，进而对模温精准控制，达成稳定模温的目标，最终实现生产过程稳定与产品品质稳定。

4. 切边方案

一体化压铸一般采用等离子切割+切边机，小批量阶段采用等离子切割，量产阶段采用切边机。压铸生产中涉及的切边方案有切边机、等离子、激光、高速锯和人工，如图6所示。

液压切边机的速度相对快一点，但要留有一定的余量来控制变形，且投资大，更适合大批量生产；等离子切边，切边性能与激光类似，甚至稍好，设备总价较低，通用性强、柔性高，各种外形复杂的铸件都能在同一台设备上处理，但耗材较贵；激光切边在欧洲的小批量生产中比较常见，优点是除弯角处外切口

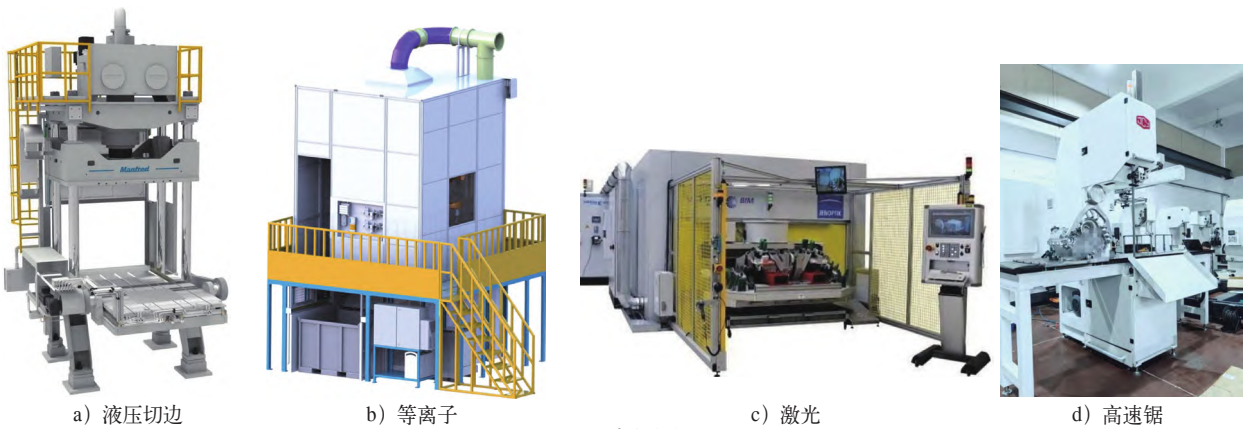


图6 切边方案类型

比较整齐，通用性强、柔性高，但切割成本较高，且适合10mm以下切割厚度；高速锯在薄壁件上容易因为受力造成产品变形；人工切边，更适合中小型压铸厂的传统小型压铸件。

5. 机加工方案

目前有大型五轴加工中心和双五轴龙门加工中心，机加工方案如图7所示。大型一体化压铸件加工特

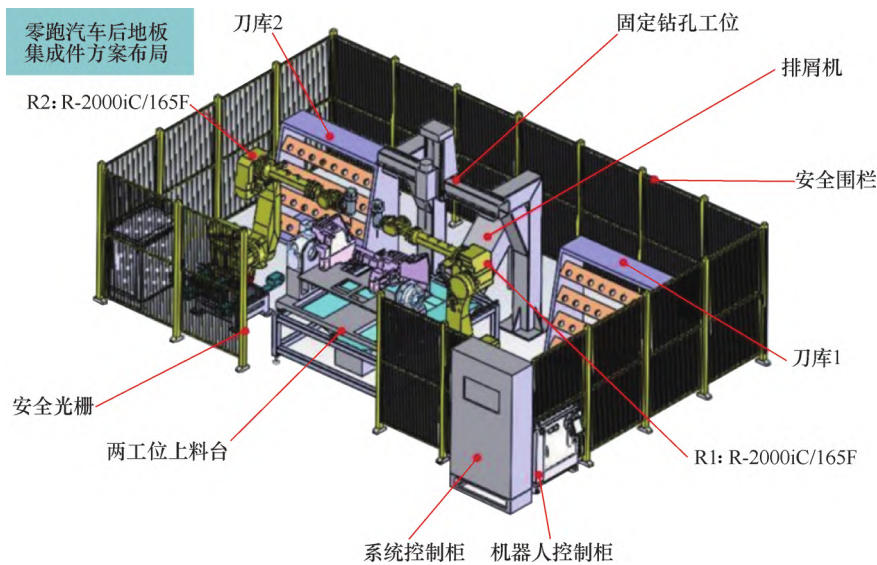
征：大尺寸行程2000mm以上；加工点位较多，但单点的加工量较小；主要为钻孔、攻丝等，空间角度孔较多。具体要根据产品特征、订单量、投入资金等因素进行选择。另外，为提高加工柔性、降低投资成本，采用机器人夹持刀具对一体化压铸件进行加工成为另外一个关注方向，现已有机器人加工车门内板的成熟案例，只是受机器人整体刚度影响，暂未应用到一体化压铸产品中。



a) 大型五轴加工中心



b) 双五轴龙门加工中心



c) 机器人加工
图7 机加工方案类型

检测工序

与其他压铸产品相比，一体化压铸产品的检测并无特殊之处，主要包括外观质量、探伤、轮廓尺寸、力学性能、台架试验以及道路测试六种。其中外观质量是指冷隔、流痕、拉伤及裂纹；探伤主要检查气

孔、缩孔、夹杂等内部缺陷；力学性能是指本体取样进行拉伸试验（抗拉、屈服、延伸率）；轮廓尺寸涉及到检具、三坐标等；台架试验包含不同方向静强度、实际工况下的耐久性能及碰撞试验；道路测试主要包括：动力性能测试（测试车辆的加速、爬坡、起

步和最高速度等性能指标)、制动性能测试(测试车辆的制动距离、制动力分配和制动稳定性等指标)、操控性能测试(测试车辆的操控性能,如曲线行驶、转弯和并线等)和可靠性测试(测试车辆在不同路况下的行驶表现和零部件的可靠性)。

作业人员素质

一体化压铸技术对研发、技术及现场等相关人员提出的高标准综合要求,涉及产品设计、材料开发、工艺模具以及现场管理四大方面。

产品设计需要结构力学、整车结构、机械制图、Catia、Abqus等方面知识储备,材料开发需要掌握凝固原理、合金配方、材料力学基础知识等,工艺模具方面精通流体力学、工艺参数、浇排系统、模具设计、热力学及表面处理工艺等,现场管理则具备熟悉设备操作、电气/液压、自动化编程、精益生产、质量管理及人员培训等多方面技能。

压铸行业从业人员仅有30余万,属于小众行业,但又是典型的多学科交叉领域,对从业人员的知识储备、现场实操有着全面的要求,一体化压铸技术的产

业化将其要求又提升数个数量级。

结语

一体化压铸技术,从本质上讲是压铸技术配套真空系统,外加超大尺寸产品的特征,仍然属于传统技术的改进与拓展,然而超大尺寸却使整个产业链发生了从量变到质变的过程。

在此之前,压铸机最大吨位在4000t级别持续二十余年,而高度集成化的一体化压铸产品不断触及吨位天花板,目前已在研发20 000t压铸机,随之而来的是设备加工与控制精度难度的提高;大尺寸产品在压铸过程中,充填距离超过2m,浇排系统显得尤为重要;100kg以上的浇铸质量和几十毫秒的充填时间,大幅度缩小了工艺窗口,对设备性能、模具水平、人员素质均提出高标准的要求;压铸铝合金需要满足中等强度、高延伸率、免热处理、良好铸造性能和低成本的综合要求。

因此,一体化压铸技术的推广应用,需要汽车、设备、压铸、模具、材料及科研等多板块、全链条协同合作,助力于一体化压铸的软着陆。**AUTO1950**

特斯拉上海超级工厂下线全球第1000万个电驱系统

特斯拉于近日通过其官方宣布,已成功解锁首个“1000万”里程碑——在上海超级工厂下线了全球第1000万个电驱系统。

特斯拉在官媒中表示:“我们重新定义了电驱系统,从零开始自研自产。这1000多万颗强大的‘心脏’,让我们的每一款车型都成为了性能车。感谢600多万车主的支持与陪伴,我们一起加速世界向可持续能源的转变。”特斯拉表示,从最初的1个电驱系统发展到今天的1000万个,这一历程见证了特斯拉的实际行动与承诺。

起初,特斯拉的生产线只能实现单台电驱系统的生产。然而,随着技术的不断革新和生产能力的提升,特斯拉现在已经拥有了5条生产线,并且仍在不断扩大生产规模。如今,全球范围内平均每5秒钟就有一

台电驱系统下线。

电驱系统是电动汽车的核心系统之一,主要由驱动电机、电机控制器和减速器(或变速器)组成。特斯拉在电驱系统的自主研发和生产上取得了显著成果,这一里程碑的达成不仅展示了特斯拉在电动汽车技术领域的领先地位,也进一步推动了全球电动汽车产业的发展。

特斯拉强调,这1000多万个强大的心脏(电驱系统)赋予了每一款特斯拉车型卓越的性能。同时,特斯拉还表达了对全球600多万车主的感激之情,认为他们的支持是对特斯拉产品力的最佳证明。

特斯拉承诺将继续与所有车主一起,加速推动世界向可持续能源的转变,共同驶向一个更加绿色、智能的未来。