一体化压铸技术之发展博弈

高玉刚，王晓迪，张壮，徐世文，常海平，万雅春
中信戴卡股份有限公司　河北秦皇岛　066011

摘要：近几年一体化压铸技术得到了整个汽车行业上、中、下游的广泛关注，并取得了突飞猛进的发展，同时也遇到极大挑战、遭到了诸多质疑。从应用范围、压铸材料、产品质量、投资回报和维修再生五个方面，详细分析了一体化压铸技术所面临的困难，并指出了相应的发展策略。

关键词：一体化压铸技术；博弈；发展策略

近年来，新能源汽车一直保持高速发展[1]，围绕续驶里程、成本等问题，涌现出了先进动力电池、CTP/CTB/CTC、滑板底盘、一体化压铸等一系列先进技术与产品[2~5]。其中，一体化压铸技术因其超高度集成、极大简化工序、显著提高生产效率、指数级简化生产管理、铝合金材料易回收及可观的低碳化空间等诸多颠覆性特征，受到了新能源汽车的追捧，并有望掀起汽车制造革命热潮。

在空前关注和大力投资下，在过去几年一体化压铸技术实现了繁荣发展，同时也受到了各界的质疑，甚至反对.。比如大型一体化压铸件集成度与主机厂内部分工问题，免热处理材料与变形问题，一体化压铸技术是否轻量化、轻量化成本以及轻量化空间问题，一体化压铸件合格率能否达到现有成熟压铸产品，一体化压铸技术投入产出比及单件成本问题，采用一体化压铸件的整车的安全性和维修成本问题，全铝车身是否是未来方向等等。因此，在一体化压铸技术如火如荼发展的同时，需要产业决策者和技术人员谨慎判断、思考、辨别、验证其技术风险和未来发展方向。

整车上的应用范围

一体化压铸技术，可简单理解为超大尺寸产品压铸成形技术，具有尺寸大、集成度高及一次成形等特点。但一体化压铸技术打破了非常成熟稳定的整车制造工艺（冲压-焊装-涂装-总装四大环节）和整车结构（动力总成、底盘、车身、电气设备四大部分），特别是CTC（Cell to Chassis）、CTB（Cell to Body）、滑板底盘等技术的出现，对车身、底盘工艺路线以及两者原有清晰界限造成了巨大的冲击和颠覆。

目前，一体化压铸技术应用集中在下车体（包括后地板、前底板、前机舱）、电池包以及未来的上车体和侧围，一体化压铸技术持续深入的发展甚至会影

响四门两盖和底盘的结构形式。CTC技术、CTB技术就是将电池包部分结构集成到下车体，而滑板底盘则是将电池包部分结构纳入了底盘部分，一体化压铸技术采用一体压铸成形工艺，而摒弃了传统的冲压+焊装路线。比如，一体化压铸后地板总成中，集成了原有的左右减震塔、左右后纵梁、两个横梁等部件，如图1b所示；一体化压铸前机舱包含了原有的左右减震塔、左右前纵梁、车身连接端面和车前端连接端面等，如图1c所示；一体化压铸电池包整合了原有的边框、横梁、底板、支架、吊耳，如图2所示；汉特曼开发的一体化压铸后副车架整合了前后横梁、前横梁上下板、左右纵梁、安装套筒、摆臂支架、梯形臂支架、稳定杆安装板等多个部件，如图3所示。



图1　一体化压铸前底板和后底板结构

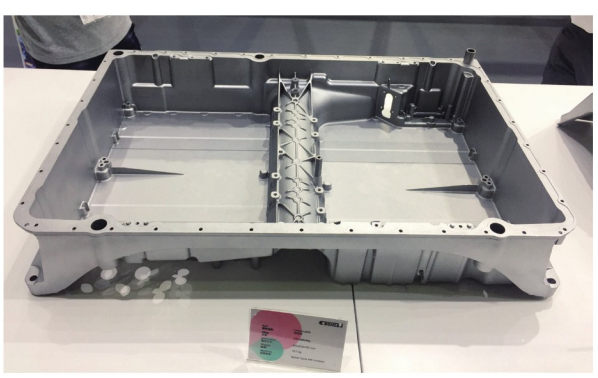


图2　一体化压铸电池包壳体

虽然一体化压铸技术拥有诸如高度集成化、整体刚度、短流程、高生产效率、便于管理、高回收率等众多优点，但面对汽车产品日益突出的快速迭代特征，一体化压铸技术明显缺乏相应的制造敏捷性和应

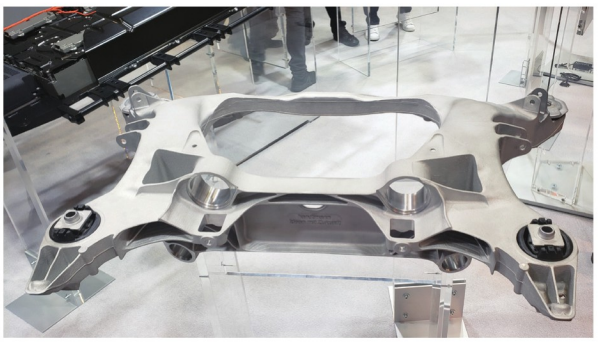


图3　一体化压铸后副车架

用平台化，高资本投入的超大吨位压铸产线需要单品海量的车型，才能降低设备模具的成本分摊。另外，由于一体化压铸技术在汽车制造体系中有“跨界”特点，无论是产品设计，还是生产管理，均需做出颠覆性的变革，这对主机厂，特别是传统主机厂，将是巨大的挑战。

新型压铸铝合金材料

铝合金汽车结构件机械性能一般要求抗拉强度240MPa，屈服强度120MPa，延伸率10%，同时兼具良好的流动性和铸造性能，通过T6/T7热处理、熔体净化、成分优化等手段基本可以满足要求[6]。然而，大部分一体化压铸件单向尺寸最大在1200mm，甚至1600mm以上，壁厚2-4mm，若依然采用热处理来提高产品延伸率，则热处理变形将会被进一步放大，最终合格率大幅下降。在此背景下，免热处理合金成为各主机厂、压铸厂、原材料厂的关注重点和研发热点。

国内外的众多企业、科研院所，包括特斯拉、蔚来汽车、美国铝业、德国莱茵费尔登、立中集团、上海帅翼驰、上海交通大学等，都在开发和推广免热处理铝合金材料，各家材料均具备自己的性能特点，如表1所示。免热处理铝合金材料涉及了两个系列多个牌号：Tesla Alloy、Castasil-37、Aural 5、Aural 6、C611、LDHM-02、JDA1x等Al-Si系列和Magsimal-59、Castaduct-42、C446F、A152、A153、JDA2x等Al-Mg系列。通过对化学成分的对比，无论是Al-Si系列还是Al-Mg系列，存在几个共同点：一是Fe含量较低，大多要求0.2%以下；二是Mn含量基本在0.3-0.8%之间；三是Al-Si系列Mg含量较低，甚至不含Mg，而Al-Mg系列Si含量较低；对主合金元素、杂质元素、变质剂含量要求极为严格。

表1 免热处理铝合金研发与应用现状

公司	牌号/系列	知识产权	应用现状
Tesla Inc.	Tesla Alloy 1/2/3 Al7SiCuMnMg	自主研发 US2021014177	应用于Model Y车身后底板
蔚来汽车	-	-	成功验证了可用于制造大型压铸件的免热处理材料
Alcoa	EZCAST系列C611 Al7SiMgMn	自主研发	早已被欧美多家客户广泛应用于薄壁结构件的生产
Aluminum Rheinfelden GmbH	Castasil-37 Al9SiMnMoZr	自主研发	合金成熟，早已实现批量应用
	Magsimal-59 AlMg5Si2Mn	自主研发	合金成熟，早已实现批量应用，但壁厚敏感性强，影响其应用范围
立中集团	LDHM-02 Al-10Si-Mn-Mo	自主研发/ CN111139381B	实现小批量生产应用，已与多家主机厂、压铸厂达成战略合作
上海帅翼驰	EZCAST系列C611	授权代理	国内率先布局非热处理车身结构件铝合金，EZCAST系列大陆独家代理商
上海交通大学	TechCastTM Al-Si-X-RE	自主研发/ CN110079714B	超大铸件用低碳铝合金，并应用于高合汽车一体化压铸后舱

考虑到铸造性能（流动性、充型能力、热裂和缩松倾向）、熔炼成本和技术难度等因素，Al-Si合金是目前应用最为广泛的压铸铝合金，下面以其为例进行介绍。介绍免热处理合金前，有必要了解一下目前应用最广泛的车身结构件用压铸铝合金，RHEINFELDEN的Silafont-36和欧标的AlSi10MnMg，两者化学成分基本一致（见表2），较常规铝合金，通过严控低Fe含量和T7热处理来提高延伸率，并加入Mn元素以解决Fe含量降低所带来的粘模问题，可通过调整优化Mg元素含量及热处理工艺，以达到产品的不同强、韧需求，早在20世纪90年代就实现量产应用，比如奥迪A8的全铝车身结构件。

在此基础上，如表2所示，高强韧Al-Si系列合金做到免热处理的思路主要分为两种：

1）低硅少镁严控铁，以Tesla Alloy 1为例[7]，降低Si含量、控制Fe含量以提高延伸率；Si含量不低于6.5%以保证合金的流动性；适量添加Cu元素，并控制Cu/Mg比例，促进AlCuMgSi相析出，提高强度的同时不会明显影响延伸率；添加Mn元素以解决粘模问题；V/Cr微合金化，改善富铁相形貌，以提高合金对Fe的容忍度。

2）高硅无镁微合金化，以LDHM-02为例[8]，9.1%～10的硅含量以保证较高强度和良好的流动性；较低的Fe含量和Mo/Zr微合金化，以提高延伸率；添加Mn元素以解决粘模问题；严格控制低Mg含量，以保证铸件较高延伸率和热稳定性。

一体化压铸技术引入免热处理铝合金，在满足产品对强度和延伸率要求的同时，可省去热处理工序，从而可以避开大尺寸薄壁铸件的热处理变形问题。然而，作为一个重要的强韧化手段，热处理除了可以提高力学性能和耐腐蚀性能外，还能稳定尺寸，改善切削加工和焊接等性能，若被省去是否会带来其他问题，是否对前后工序提出新的要求，这都值得去深入研究和综合考量。

表2 高强韧压铸铝合金化学成分（质量分数） （%）

成分	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	其他	Al
Silafont-36	9.5～11.5	0.15	0.03	0.5～0.8	0.1～0.5	0.07	0.04～0.15	Sr	Bal.
AlSi10MnMg	9～11.5	0.25	0.05	0.4～0.8	0.1～0.6	0.07	0.2	Sr	Bal.
Tesla Alloy 1	6.5～7.5	0.4	0.4～0.8	0.3～0.7	0.1～0.4	-	0.15	Sr/V/Cr	Bal.
LDHM-02	9.1～10.0	0.15	0.03	0.35～0.60	0.06	0.05	0.06～0.15	Sr/Zr/Mo	Bal.

车身结构件一般采用AlSi10MnMg，并进行T7热处理，即固溶+（过）人工时效。在此过程中：共晶硅逐步分解、球化，提高延伸率，改善其切削性能和焊接性能；压铸时非平衡凝固导致的微观偏析得到缓解，微观组织更均匀，Cu、Mg等元素回溶入基体再弥散析出；可消除壁厚不均、冷却速度不一致产生的内应力，使压铸件尺寸和轮廓更稳定。实际生产中，可根据实际产品技术要求，调整保温温度/时间、淬火介质/速度、时效温度/时间，具有很强的灵活性。然而，免去热处理工序后，能够影响压铸件组织和性能的因素只有化学成分、熔化和压铸工序，这就对化学成分的设计、熔化工艺和压铸工艺提出了更高的要求，其中某一项参数的微小波动都有可能直接影响产品的性能。此外，仅凭优化细化和变质工艺，很难达到热处理后共晶硅的球化效果。

产品质量

铝合金压铸件质量问题涉及表面缺陷（冷隔、拉伤、流痕、裂纹等）、内部缺陷（气孔、缩孔、夹渣、机械性能等）、几何缺陷（变形、尺寸等）三方面。随着压铸单元及控制系统、压铸模具技术、压铸工艺、现场管理制度的不断完善、成熟与发展，一体化压铸件所面临最大的质量问题是变形超差。之前采用的方案有：优化压铸件结构、完善压铸工艺、切边机反变形设计、矫形整形处理等措施，然而随着一体化压铸件尺寸的变大，变形量也被逐步放大，若依旧采取既有的方案，效果甚微，继而影响成品率。免热处理铝合金应运而生，并成为汽车行业一体化压铸技术落地的关键。据报道，使用免热处理铝合金制备一体化压铸件，在保证高强度、高延伸率的同时，无需热处理工艺，可避免热处理过程中的变形，提高产品合格率，减少设备投资，降低碳排放。

但是必须要注意的是，热处理只是引起压铸件变形的众多因素之一，压铸件变形原因主要分为外部因素和内部因素。外部因素包括开模时间、顶出工艺、局部粘模、拔模角、包紧力设计等，外部因素引起的变形可通过压铸工艺、模具设计和产品结构优化来解决。从内部因素考虑，压铸件变形的本质是因为压铸件的内应力分布不均匀，使压铸件在某一温度下承受的应力大于该温度下的屈服极限，从而产生变形，同时变形结束后形成残余应力。而内应力分布不均主要是由温度和结构因素造成的，内应力是在压铸凝固过程和淬火过程中形成，在开模顶出取件阶段、固溶过程、时效过程释放，内应力形成和释放均可引起变形。

压铸件冷却凝固时，各部分冷却速度不一致，在同一时刻引起的收缩量不同，但各部分又彼此相连、相互制约，因而产生了内应力，足够大时会产生变形。热处理加热过程中，压铸件各部分温度上升不均匀一方面会产生热应力，又称临时热应力，另一方面会消除凝固时产生的既有内应力，若压铸件强度因温度上升而降低的速度大于应力消失的速度，也会产生变形。热处理淬火过程中，压铸件薄壁部位/表面冷却速率较厚大部位/心部大，且前者温度低、屈服强度高，继而形成瞬时热应力，前者为拉应力，后者为压应力，足够大的应力会造成变形。无论是人工时效还是自然时效，均可消除压铸件的内应力，稳定组织和尺寸，同时也发生一定程度的塑性变形。整体而言，免热处理铝合金解决了热处理过程大尺寸压铸件变形问题，但是对凝固收缩引起的开模顶出取件变形并无作用，还有可能带来或加剧自然时效、机加工、后处理等工序中的变形问题。另外，离开热处理对压铸件微观组织的改善作用，自然强化铝合金在强度和延伸率方面明显不如析出强化铝合金，且后者在高强高韧上更具发展前景。

因此，免热处理铝合金是一体化压铸技术未来发展的重点方向之一，但真正全方位解决一体化压铸件制造变形、尺寸超差问题，建议依据“第一性原理”，寻找真因，在源头施加措施。当然，铝合金压铸件的内应力、变形问题不可能完全消除，只能通过结构设计、CAE、压铸工艺优化、模具设计、工装治具等多方面努力，不断减低变形量。另外，从整车角度出发，随着车身设计水平的发展，不断提高对一体化压铸件变形量的容忍度。

产线投入与产出

据相关报道，由于采用了一体化压铸技术，Model Y后底板成本下降20-40%，这对严控成本的汽车行业来说极具诱惑。关于一体化压铸技术能否真正带来20%-40%的降本，降本是基于何种情形和假设，降本空间是

否具有通用性，本文不做深入分析和探讨。本节重点关注一体化压铸产线的投资回报。众所周知，车用铝压铸行业具有资金密集和适合单品海量的特点，一体化压铸技术进一步提升准入门槛，而全自动化智能压铸单元更加凸显了“批量生产”的特征。

大尺寸一体化压铸件，在产品质量上对机械性能、尺寸精度、表面状态、一致性等有着更严格的要求，在生产制造上对原材料、设备能力、生产稳定性、自动化、智能化等有全方位的依赖。这就对一体化压铸产线设备的覆盖范围、重复精度、运行稳定性等提出更大的挑战，进而大幅增加了产线的投入成本。

汽车结构件压铸生产线一般包括熔化设备、压铸单元、热处理设备（免热处理合金除外）、机加工设备、矫形设备、压铸模具、其他工装夹具等。对于一体化压铸生产线而言，熔化设备包括集中熔化炉和转运包，集中熔化炉可以通用，转运包需要增大容量。压铸单元包含压铸机及机边炉、真空系统、模温控制系统、喷涂系统、取件、完整性检查、冷却槽、切边机、除尘罩、传送带、放置架等周边设备，其中大部分设备均需要升级或增加数量。热处理设备最大容纳尺寸显著变大，主要包括保温炉、淬火槽、时效炉、框架（含固定装置）、传输轨道等，其中框架为相应产品专用框架。根据机加工方案的不同，机加工设备前期投入差别较大，比如多工序三轴/四轴加工中心、单工序五轴龙门加工中心、机器人加工，当然对应的效率和适用加工特征也有所差别。一体化压铸件特点对压铸模具的设计与制造产生了巨大挑战，比如浇排系统设计、模具热平衡设计、模流分析、模具材料及表面处理、模具加工设备及环境、车间与行车能力。

下面将以产能年50万的后地板生产线为例，对比传统冲压+焊接和一体化压铸成型的投资和成本，如表3所示。

表3　年产50万辆后地板两种技术路线投资对比

项目	传统冲压+焊接/亿元	一体化压铸成型/亿元
成型设备（含模具）	1	3.6
焊接设备	1.25	0.9
焊点耗费	3.75	0.25
人工成本	0.5	0.05
合计	6.5亿元	4.8亿元

（1）传统冲压+焊接技术（路线一）：大约需要大型压力机1台、小型压力机15台、大型模具1套、小型模具15套，设备的总成本约为1亿元；焊接环节则需要焊接机器人2台、焊接搬运机器人1台、夹具1组，设备成本约为1.25亿元；每件700～800个焊点，共耗费3.75亿元；大约需要200～300名员工，人力成本约为0.5亿元。

（2）一体化压铸成型技术（路线二）：单件节拍180s、每天生产20h、一年工作300天计算，则单各压铸单元产能在12万件/年，压铸模具寿命8万～10万模次，总共需要四个压铸单元、六套压铸模具。其中，一体化压铸技术核心设备——压铸机，吨位一般不低于6000t，粗略估计4000万元，周边设备2000万元，压铸模具价格在1500万～2000万，寿命8万～10万；每件焊点50个左右，共耗费0.25亿元；大约需要20～30名员工，人力成本约为0.05亿元。

（3）除上述成本之外，一体化压铸车间占地面积大幅缩小，但其对地基、行车等方面有着较高的要求，因此，在基建方面，两种技术路线成本相当。另外，值得注意的是，路线一的冲压模具寿命可达500万～600万模次，单件模具分摊较路线二（8万～10万模次）大幅降低。

基于以上投资成本分析，可从两方面分析路线一和路线二的优劣势：一是新建生产线，刚性成本方面路线二明显较少，且由于大大简化了工序，路线二在供应商管理、内部生产管理、质量管控等多方面柔性成本大幅降低，同时考虑材料、设备、工艺、结构设计等方面的壁垒和，目前路线二的风险成本处于高位；二是现有生产线，路线一在刚性成本和风险成本方面较低，而在柔性成本方面依旧处于高位。上述分析也恰恰印证了目前一体化压铸在新能源汽车，特别是造车新势力范围开发和应用的渗透率较高，而传统主机厂则持有更谨慎的态度。

此外，由于压铸工艺的“批量生产”特征，一体化压铸技术需要年销量10万辆的车型来支撑，否则高昂的设备成本分摊会使单件或整车成本高居不下，甚至严重侵蚀上下游利润空间。目前，国内外有十余家主机厂在开发一体化压铸技术，十余家压铸厂商布局几十个大吨位压铸单元，接下来5～10年一体化压铸市场必将迎来惨烈的竞争。

维修与回收

1.维修成本

一体化压铸技术在市场端最大的话题。恰恰因为一次铸造成型，一体化压铸件损坏后无法采用钣金修复方法，只能整体更换，这必将带来保费增长，进而转嫁到消费者，当然这只是普通视角所作的判断。事实上，一体化压铸产品，不管是后底板、中底板，还是前机舱，都位于整车中较为“隐蔽”的位置，普通刮蹭或碰撞难以伤及到此。因此，在产品设计时，在考虑结构性能和制造成本与难度的同时，也要兼顾“可修复性”。例如，后底板、前机舱的一体化压铸设计时，结合前后防撞梁，优化碰撞力的传递路径，分段分解吸收碰撞能量，最大程度降低一体化压铸件的受损风险。另外，在新能源汽车赛道上，除了一体化压铸技术，自动驾驶技术也取得了不错成绩并得到大量应用，这将会大大提高汽车的主动安全性能。

2.回收再生

极高的回收率是一体化压铸产品的最大优势之一。成本是汽车行业的核心要素，而碳排放将会以碳积分的形式转换为成本，而成本的最客观、最合理的评价方式是全生命周期评价（Life Cycle Assessment, LCA），即对产品的整个生命周期——从原材料获取到设计、制造、使用、循环利用和最终处理等，定量计算、评价产品消耗的资源和能源以及排出的环境负荷，也就是从摇篮到坟墓的全过程[9]，其中提高整车报废回收率无疑可大大降低整车全生命周期成本和碳排放量。一体化压铸技术件特点：单一牌号、回收率极高的材料、集成上百个零件一次压铸成型，其材料回收率可达95%以上，且回收过程流程极短。而钢板冲焊产品特征：多个牌号、回收性能较差的材料、多次冲压/焊接，材料回收率不足60%。因此，一体化压铸件的全生命周期成本和碳排放具有很强的竞争优势。

结语

一体化压铸件，集成化特征减少了零部件数量和连接工序，低成本、短流程、短开发周期满足了市场多样化、车型快速迭代的需求，因此，一体化压铸技术必然是汽车车身未来发展的重要方向之一。但是，在一体化压铸技术快速发展过程中，企业决策者和技术人员要重视以下几点：

1）混合材料车身依旧是最佳方案，一体化压铸产品不能一味地集成化，要根据产品的轻量化、成本、效率、安全的需求，寻找平衡点。

2）免热处理压铸铝合金确实可以解决产品变形超差问题，但不能忽视无热处理的弊端，高强、高韧、环保、易回收才是理想的压铸铝合金。

3）解决大尺寸压铸件变形问题，要从本质和源头出发，多方面综合突破，以提高良品率。

4）产线投入高低不能一概而论，应以敏捷制造方式，最大程度实现批量生产，才能降低生产成本。

5）一体化压铸件生产、使用成本，必须基于全生命周期评价。

参考文献

[1] 刘晓洁，别玉娟，陈自兵. 新能源汽车发展对制造工艺影响分析[J]. 内燃机与配件，2021，06：208-209.

[2] Li Shen, Marzook Mohamed Waseem, Zhang Cheng, Offer Gregory J., Marinescu Monica. How to enable large format 4680 cylindrical lithium-ion batteries[J]. Applied Energy, 2023, 349: 121548 .

[3] 赫炎. 从CTP、CTC、CTB浅谈电动汽车动力电池集成技术[J]. 世界汽车，2022，6：70-71.

[4] 姜涛，刘辰，贾国瑞. 汽车滑板底盘技术体系研究[J]. 专用汽车，2023，6：25-29.

[5] 杨英春，韩星，张晓庆，岳凯，刘海峰. 轻量化驱动下的一体化压铸技术简析[J]. 铸造工程，2023，47（4）：11-15.

[6] 卢宏远，卢敏，宋青，王禹鹏. 汽车结构件的压铸[J]. 特种铸造及有色合金，2012，32（3）：251-254.

[7] STUCKI JASON. Die Cast Aluminum Alloys for Structural Components[P]. USA: US2021014177, 2021-01-20.

[8] 郭军辉，叶艳平，赵玉兵，等. 一种铝合金结构件材料及其制备方法[P]. 中国专利：CN111139381B, 2021-06-08.

[9] 徐建全，杨沿平. 考虑回收利用过程的汽车产品全生命周期评价[J]. 中国机械工程，2019，30（11）：1343-1351.