一体化压铸切边整形技术的发展现状

苏月峰[1, 2]，康运江[1]，林　通[1]，刘镇宁[1]，徐思锴[1]，高晓东[1]
（1. 中国机械科学研究总院机科发展科技股份有限公司，北京 100044；
2. 北京科技大学机械工程学院，北京 100083）

摘要：一体化压铸技术在汽车领域通过将几十甚至上百个零件压铸为一个零件的技术方法取得了快速的发展，然而压铸件在脱模后有较多的废料需要切除，且易在脱模过程中常发生翘曲变形，因此后处理中切边整形（矫形）技术成为保证一体化压铸件合格的关键。本文针对切边整形技术进行综述，主要包括：切边技术，如切边模、机器人切边、热-机械振动以及高速锯切等；整形技术，如热模整形、点对点挤压整形和模内补偿整形等；切边整形一体化技术，如模内切边整形复合技术、冲压领域的切边整形结构等。提出了未来可能的发展方向，旨在为一体化压铸件的切边整形技术的发展提供参考。

关键词：一体化压铸；切边；切边模；模具设计；整形（矫形）；挤压矫形；补偿整形；切边整形一体化
中图分类号：TG249.2　**文献标识码：**A　**文章编号：**1001-4977（2026）10-1072-11
DOI：10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0137

Development Status of Trimming and Straightening Technologies in Giga-Casting

SU Yue-feng[1, 2], KANG Yun-jiang[1], LIN Tong[1], LIU Zhen-ning[1], XU Si-kai[1], GAO Xiao-dong[1]
(1. Machinery Technology Development Co., Ltd., China Academy of Machinery Science and Technology, Beijing 100044, China;
2. School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Integrated die-casting technology has made significant progress in the automotive field by consolidating dozens or even hundreds of parts into a single cast component. However, the die-cast part has excessive waste that needs to be trimmed after demolding, and warping often occurs during the demolding process. Therefore, trimming and shaping (straightening) techniques in post-processing of die-cast parts have become critical to ensure the qualification rate of giga-cast parts. This paper reviews the trimming and shaping technologies, including the trimming techniques such as trimming dies, robotic arms, thermo-mechanical vibration, and high-speed sawing; the shaping techniques such as hot die straightening, point-to-point extrusion straightening, and in-die compensation correction; and the integrated trimming and shaping techniques, such as in-die compound trimming and shaping technologies, as well as trimming and shaping structures from the stamping field. Possible future development directions are put forward, aiming to provide a reference for the development of trimming and shaping technologies for integrated die-cast parts.

Key words: integrated die-casting (giga-casting); trimming; trimming die; die design; shaping (straightening); extrusion straightening; compensation straightening; integrated trimming and shaping

在“双碳”目标的驱动下，一体化压铸技术在汽车领域迅速发展，因其有降本增效、节能减排的伟大前景，已成为各大车企提升竞争力的核心发展战略[1]。一体化压铸技术凭借其将几十个甚至上百个零部件集成为一个大型铸件的颠覆性效果，正在重塑传统的汽车车身制造工艺[2-3]。该技术并非新技术，但由特斯拉率先在Model Y车型上的应用而成功推广，将后底板的79个零件减少为1个，焊点从700~800个减少至50个，制造成本大幅下降，制造时间从1~2小时缩短至3~5分钟[4]。此后，蔚来、小鹏、极氪、小米和长安等国内外主流车企纷纷布局，推动了一体化压铸技术的快速产业化[5]。

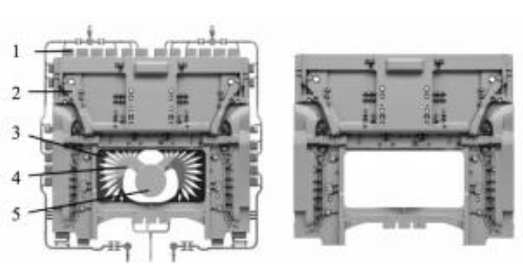
在汽车领域一体化压铸设备如今常以“压铸岛”的形式进行装备布局[6]，如图1所示，集成压铸机、自动化装置、温度控制系统及各类后处理设备。典型的超大型压铸岛包含由压铸机、模温机、真空机、点冷

基金项目：国家科技重大专项“高端数控机床与基础制造装备”项目（2024ZD0707501）。
收稿日期：2026–06–03 收到初稿，2026–07–15 收到修订稿。
作者简介：苏月峰（1992–），男，博士生，主要研究方向为机械制造及其自动化。E-mail：709993777@qq.com
通信作者：康运江，男，正高级工程师，博士，博士生导师。电话：13810618693，E-mail：kangyj@mtd.com.cn
引用格式：苏月峰，康运江，林通，等 . 一体化压铸切边整形技术的发展现状 [J]. 铸造，2026，75（10）：1072–1082.
Su Yuefeng，Kang Yunjiang，Lin Tong，et al. Development status of trimming and straightening technologies in giga-casting [J]. Foundry，2026，75（10）：1072–1082.

图1 一体化压铸岛
Fig. 1 Integrated die-casting cell

机和双定量炉组成的压铸系统；由液压折断机、切边机、矫形机、打码装置和X光检测设备构成的后处理系统；以及由取件机器人、搬运机器人和输送线构成的上下料辅助系统[7]。完整的工艺流程为：铝锭熔化→除气渣机→高真空压铸→冷却→机器人取件与完整性检测→去渣包→切边（去浇道）→打码→矫形→X射线检测→去毛刺→机加工→清洗→装配[8-10]。整个处理工序高度集成在压铸岛内，实现从压铸到成品的无缝流转。

然而，一体化压铸件从模具中取出时，必然带有压铸废料，如浇注系统（含料饼、横浇道和内浇口）、排溢系统（渣包、排气道）及飞边等多余部分[11-12]，如图2所示，因此需要在后处理部分进行切除。此外，因为一体化压铸件具有尺寸大、薄厚不一、结构复杂等特点[8]，在凝固冷却过程中产生热应力、相变应力和收缩应力，极易发生翘曲、扭转等变形缺陷[13]，因此整形（矫形）成为压铸件后处理流程中不可或缺的关键工序。切边整形技术成为后处理中直接决定产品最终良品率和力学性能的关键。传统的手工敲击、打磨方式不仅效率低下、劳动强度大，更易造成铸件二次损伤，已无法满足现代自动化生产的需求[14]。随着一体化压铸技术不断发展，压铸件的尺寸从1 600 mm延伸至2 000 mm以上，甚至特斯拉所提出的白车身一体成形[15]的快速发展，切边整形技术向着高效化、自动化、精准化及一体化方向发展的需求也逐渐变大。因此，本文系统阐述一体化压铸中切边和整形技术的研究进展，旨在为该领域提供技术支持。



（a）切边前 （b）切边后
1. 排溢系统 2. 压铸件 3. 浇口 4. 进浇系统 5. 料饼

图2 一体化压铸后车身及需切除部分
Fig. 2 Integrated die-cast rear body and the material needed to be trimmed

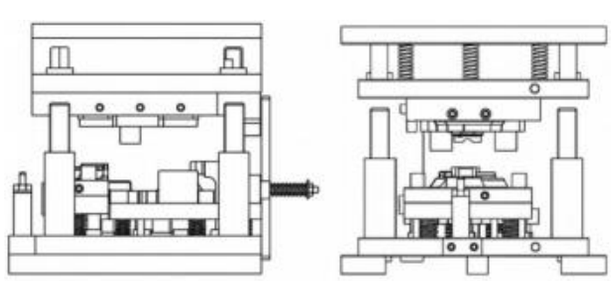
1 切边技术

切边是一体化压铸件后处理流程中的首道关键工序，主要目的是去除铸件上多余的浇注系统（料饼、横浇道和内浇口）、排溢系统（渣包、排气道）及飞边等附属物，使铸件本体与多余部分分离[16]。切边质量直接影响产品的断面质量、尺寸精度和后续工序的可加工性。

1.1 模具切边技术

在切边工艺中，切边模具有适合量产、一致性好和易实现自动化的优势应用较多[17-18]。切边模的核心原理是利用切边模的凸模与凹模之间的相对运动，上、下刃口闭合时产生的剪切力，使压铸件本体与多余部分沿刃口轮廓发生剪切断裂而分离，被切除的废料通过底座漏料孔排出[16，19-20]。根据切边时铸件温度不同，模具切边分为冷切（室温）和热切（铸件带有150~300 ℃余温）两种方式。冷切主要应用于非紧凑式生产线或中小型铸件，操作简单，无需控制温度，但所需冲切力较大。多数汽车生产商较早的压铸生产线中多应用了冷模切，像长安汽车部分车型前舱、后底盘等。热切是利用材料在高温时具有塑性好、变形抗力低的特点，使所需的冲切力较小，更适用于大型薄壁一体化压铸件[16]和压铸岛中，像东风汽车的电池托盘等尺寸较大的、生产线更紧凑的场景。

切边模主要分两种，刃口为同一冲切方向的为单剪切模，刃口为相对方向冲切的为对剪切模。由于单剪切容易使压铸件产生蹦边等缺陷，因此对剪切技术应用较多，典型结构如图3所示[21]，浮动对剪结构，其核心在于通过弹簧的储能与反弹实现“正冲-反弹”双向剪切，从而改善断面质量。工作过程为：合模时，上模顶料板接触产品产生预压力，随后上下模刃口同



（a）主视图 （b）左视图

图3 浮动对剪方案
Fig. 3 Floating opposed shear scheme

时接触产品上下表面；随着上模继续下行，弹簧持续储能，上下刀口完成第一次正向剪切；当弹簧到最大限位，其弹性恢复力驱动上下刀块沿原运动方向的反向运动，对产品残余连接进行第二次剪切。这种“正冲-反弹”的双向剪切机制，有效避免了传统单次冲切可能导致的断面撕裂和残留过高问题，使冲剪断面更加平整，产品合格率大幅提升，江苏冠安为新能源汽车厂家提供过了该类冲切模具。

型面贴合设计是保证切边质量的重要因素，否则易造成冲切偏移，甚至变形[22]。因此设计时需要考虑一些原则：①脱模件的冷却方式决定了设计切边模具时的配做量，如果是风冷，且压铸件较大，应考虑0.5%~1%的冷缩量，如果是水冷则不考虑。②遵循支撑点和压头一一对应的原则，各压头与支撑点的高度差必须一致。③浇口较为粗大的位置在冲切时会有较大剪切力，因此必须设置可靠支撑或复位簧等，避免铸件被掰断或者被带缺料，如图4（b）[22]所示。④随形压板与支撑板的型面要确保形状贴合，保证铸件在切边模内要平稳放置，冲切力作用区域的受力均衡[22]。⑤支撑面应选择动模或者定模的成型位置，避免损坏顶杆，造成局部多料，出现局部掰断而不是冲切断，如图4（a）[22]所示。⑥对于较薄或者易于变形的位置要做好支撑和垫料，避免在冲切的过程中导致变形，尤其对于易变形件，应该着重考虑。袁静等人[13]在论文中提到压铸件在切边工序中出现冲切后整体偏移，且发生变形，分析发现，是由于支撑点和压紧点设计不合理，使压铸件受力不均，引发偏移和变形。之后通过改进支撑点，将刃口间隙重新配做后，变形废品率从2%~4%降至不足2%。

刃口设计是决定断面质量和模具寿命的核心环节。因此有研究人员[19，22-23]总结了经验。①刃口的强度和硬度较为重要。有文献提到刃口材料需要做硬度处理，如CrWMn材料需要做到硬度HRC50~55甚至HRC56~60。刃口无论开刃与否，都应考虑强度，一般设计为多坡度刃口，以确保强度（图5）；②根据不同进浇口厚度选择不同的冲切方式，当厚度大于4 mm时应选用双刃对剪，小于4 mm选用单侧冲剪；③如有多股进浇口未在同一平面上，应考虑将相应刃口高度分层设计以确保同时受力；④面对复杂的进浇口时，刃口要分组设计还要具有可调试性，以便后期调试和保养；⑤刃口的形状可借鉴冲压领域常用的波浪形刃口，通过将刃口设计为波峰波谷交替形式，使材料沿刃口方向逐段分离而非同时分离，可有效降低峰值冲裁力。

（a）浇口局部无剪切　　（b）浇口缺料

图4　铸件余料非正常切断图

Fig. 4 Diagram of abnormal cutting of the casting remnants

防粘铝设计是压铸切边模具特有问题，压铸件常用材料以镁、铝合金为主，其具有良好的延展性，在带有150~300 ℃余温切边时，刃口粘铝现象尤为常见。常用措施包括[19，22]：①刃口接触侧设计1°~2°的避让角（图5[22]），以减少接触；②刃口与铸件的间隙需分区设定，主浇口区域为0.2~0.5 mm，溢流口区域为0.8~1 mm，飞边区域为0.1~0.2 mm，有*R*角的复杂区域为1 mm以上或直接避开；③增加喷淋装置，通过喷淋润滑液减小摩擦；④对刃口表面进行涂层处理，降低摩擦系数；⑤发生粘铝后及时抛光处理。

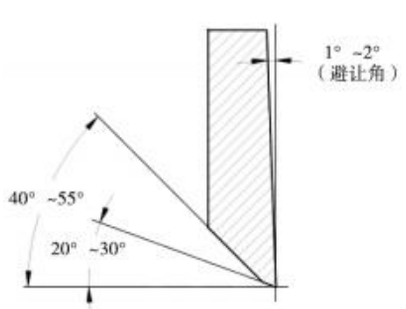


图5　刃口设计示意图

Fig. 5 Trim edge design schematic

防卡废料设计是保证自动化生产连续运行的关键[24]。设计原则[16，22，25-26]包括：相邻且独立的渣包如果有连接不易断的可能，应尽量设计在同一落料口；较长的落料如进浇道等，应考虑落料时的翻转路径，避免干涉无法准确落料；易卡料区域可设计弹顶器、活动挂臂或气缸顶出装置；增加废料刀，将较大的废料切分；废料重心应在刃口相连线之外以保证自然落下；刃口下方设置辅助结构，如废料滑板、台阶式刃口等。此外还应考虑飞边碎屑的清理，如设置吹气结构，否则残留在切边模内部容易造成压痕和划痕等。

1.2 机器人柔性分离技术

在面对小批量、形状种类多的切边中，很多人研究了机器人的使用方法，并提出了机械臂与不同去除方法的组合，如打磨、电化学、超声波、高压射流和激光等[27-31]。本田在专利[31]里提出一种自动去浇系统，包括夹具、定位装置、机器人手臂、夹持装置和冲切组件。机器人末端设置多个不同长度的杆件，端部连接切削刀和冲切块，用于在机器人运动过程中冲掉铸件上的料饼或多余金属。对于机器人应用的另一区别在于轨迹的获得方式不同，有CAD图生成、示教、视觉识别、力传感器、识别与拟合算法等。挪威的研究者[30]介绍了一种3D结构光视觉测量系统与机械臂组合的切边方法，相比于传统的基于CAD图纸或者力传感器的方法更为精准。基于3D结构光的视觉测量系统，通过扫描铸件本体，创建3D网格，生成切削轨迹，再将切削轨迹传递到切削执行端，执行端是带有气动主轴和硬质合金切削刀具的切边结构，整体结构的切削动作由机械臂带动完成。该方案具有快速识别、自适应性强，减少夹具误差和位姿误差等优点。此外基于 3D视觉的点云分割与公差约束非刚性配准方法[32]，其核心在于，首先通过扫描点云与CAD模型之间的距离差异和法向差异识别多余部分的点云，实现区域的自动分割；随后利用公差约束非刚性配准对机器人加工轨迹进行修正，使轨迹能够适应铸件实际变形，同时避免因传感器噪声或点云拼接误差导致轨迹过度变形。该方法具备对去除部分的精度识别、轨迹适应和制造公差约束等功能，更多应用于大型一体化压铸件切边后的残余毛刺的精修。

1.3 热－机械振动分离技术

热-机械振动（Thermomechanical Vibration Technique）[33]去浇道是一种新型非接触式切边方法，利用激振器在铸件浇口位置激起弯曲模态振动，产生循环交变应力，引发疲劳损伤累积直至断裂。该方法先将铸件均匀加热至一定温度，形成热预应力状态，降低材料屈服强度，随后施加正弦扫频激励，使浇口处产生弯曲共振。该研究对AlSi13Fe合金在高温200 ℃和振动共同作用下，浇口处在约27 s内实现铸件与浇注系统的分离。由于整个过程不涉及机械冲切，铸件本体不会产生残余应力，从根本上避免了传统冲切可能造成的二次损伤。该技术仍在试验阶段。

1.4 其他切边技术

高速锯切[34]是利用高速旋转的锯片对铸件浇道进行机械切断，其原理属于传统的切削加工范畴。其技术成熟，成本低，但锯切易造成变形、截面粗糙且不适合复杂结构，主要适用于中小型压铸厂的传统压铸件生产，特别是壁厚较大（通常大于5 mm）、形状相对简单、对断面质量要求不高且后续有余量进行机加工的铸件。

人工锤击[19]是最传统的去浇道方式，操作者手持木锤、橡胶锤或金属锤对铸件的浇口、渣包和飞边进行敲击，利用冲击力使脆性的连接部位断裂分离，该方法虽成本低，操作灵活，但效率低，敲击力度和位置难以保持一致，经常出现“切边带肉”或切边不足的情况，产品质量难以保证，随着自动化技术的发展，其应用铸件减少[13，19]。

等离子切割技术[16]，其设备总价相对较低，柔性高、通用性强，各种外形复杂的铸件都能在同一台设备上处理，但耗材贵，切割断面不平整，存在热影响区。主要适用于小批量试制或者复杂结构的粗切。

激光切割是利用高能量密度的激光束聚焦照射在铸件浇道部位，使被照射材料迅速熔化、汽化，同时以高速气流将熔化或燃烧的材料吹除，从而实现切口分离。其切口整齐、热影响区小、柔性高，可适应复杂曲线轮廓的切割，切割精度较高。其缺点是切割成本较高，设备初始投资较大。在欧洲的小批量生产中较为常见，在国内一体化压铸领域应用相对较少[16]。

1.5 各切边技术的对比

切边技术已从早期人工敲击、高速锯切逐步发展为模具切边、机器人柔性分离、以及热-机械振动等多种技术路线。不同切边方式在效率、成本、自动化程度、对铸件变形的影响、适用产品尺寸及浇道结构等方面存在明显差异。尤其在大型一体化压铸件开发和生产中，根据铸件结构、浇口形式、生产节拍、自动化水平及后续精修需求往往涉及多种切边技术，为便于对比分析，总结了典型切边技术的优缺点和适用场景，如表1所示。

表1 压铸件各切边技术的对比
Tab.1 Comparison of various trimming technologies for the die castings

技术方法	优点	缺点	适用场景	应用程度
模具冷切	效率高；节拍稳定；切口一致性好	专用模具开发成本高；铸件若变形、定位不准、支撑不足，易切伤、缺肉、裂纹或二次变形；大型件浇口长、冲切力大，易出现冲切不平衡	大批量、结构稳定的压铸件；尺寸和外观要求高的支架、壳体、缸体、常规汽车压铸件	高
模具热切	冲切力相对较低；可与压铸岛联动，减少离线转运；适合与热校正、水冷定形结合；对大型件可缩短等待冷却时间	温度波动会导致尺寸变化，影响刀口配合；铝合金热态延展性好，易出现刀口粘铝；若用水冷还要防锈、防热冲击	压铸岛内连续自动化切边；降温慢的大型铸件；需要“切边+热矫形”的薄壁件	中上
机器人柔性分离	适应性强，一套设备可适配多产品；切边类型丰富，料饼、分型线、局部飞边等；一致性较好；可叠加视觉测量、力控、等技术实现高水平切割；可搭配不同切割技术	效率低；切削质量受装夹位置和毛坯尺寸变化的影响较大；对机器人刚性、重复定位、力控、视觉测量要求高	多品种、小批量、结构复杂件；不适合作为厚大浇口的主去除手段	中上
热-机械振动分离	非接触式去除方法，不对铸件引入明显的变形和残余应力	对目标结构、激振频率、夹持方式、温度窗口非常敏感；需要做大量数据采集；对大型复杂一体件工程化难度较高	浇口设计成可振断结构的铸件；适用传动件、壳体类带浇注树产品；未来适合自动化去浇道	低
高速锯切	工艺成熟，设备通用；对直线型、厚大浇道去除稳定；比人工敲击更可控；夹具设计合理时切口质量较好	有锯屑、噪声、刀具磨损；需专用夹具，夹持不当易缺肉；对复杂多浇口、多曲面路径适应性差；效率低	中小型或局部厚大浇道；气缸体、支架、壳体类浇道初去除；适合冷却后、离线或半自动工位	中下
等离子切	非接触，切割力小，不易因机械冲切造成大件变形；对大型、厚大、连续浇道适应性好	切割表面飞溅多，有热影响、烟尘、氧化渣；需保证被切本体连续以不断弧，模具和浇道设计需配合，效率较低	大型一体化后地板、前舱、电池托盘等大尺寸铸件的料饼/粗浇道去除；适合作为“粗切”，后续再去毛刺精修	中
激光切	非接触、路径柔性高、热输入相对集中；适合机器人或龙门系统，理论上切缝窄、精度高	铝合金高反射、高导热，对激光功率和防护要求高；厚大浇道切割效率未必优于等离子或锯切；有烟尘、飞溅、反射安全风险，设备投入高	更适合 薄飞边、薄料边、局部精细轮廓切割，或研发小批量柔性工件	中下
人工锤击	投入最低；灵活；适合临时返修、样件、小批量；不需要复杂设备	效率低、劳动强度大；一致性差；薄壁件易敲击变形、崩缺；安全、噪声、粉尘问题明显	样件、试制、返修、小批量；简单小毛刺、小渣包	中下

2 整形技术

一体化压铸件通常结构复杂、尺寸大，壁厚差异大在生产和搬运中极易发生变形或应力集中。Hofer等[35]从壁厚差和浇注系统角度指出，压铸件在凝固冷却过程中，厚薄壁区域冷却速率不同会导致收缩不一致，而模具及浇注系统对铸件自由收缩的限制会进一步诱发残余应力和翘曲变形。Alireza等[36]则从完整工艺链角度指出，压铸件最终变形并非只由成形阶段决定，切边和热处理等后续工序也可能改变零件的应力状态和几何形貌。因此整形（又称矫形）是后处理流程中保证铸件质量的关键，其本质是通过外力作用使工件发生微小的塑性变形，从而释放或重新分布残余应力，达到校正形状的目的。

2.1 模具整形技术

模具整形也分冷整形和热整形。冷整形（常温整形）是在不额外加热的情况下，对已经冷却固化的铸件通过模具施加外力，使其产生受控塑性变形，从而抵消原有翘曲、弯曲、扭曲或局部凸起。常采用常温整形的情况有：小型压铸件、薄壁件（<3 mm）[37]、变形量较小（矫形量过大易产生材料断裂）、小批量生

产（临时整形方案）、以及冷却的返修件以及生产线不紧凑，零件生产后有存放环节等场景。常温矫形的案例有发电机支架[13]、车身前轮罩搭接件[38]的整形以及巢湖宜安[39]常温滚动挤压整形和宁波赛维达[40]的多方向整形等。

在大型压铸件的制造中，压铸件从压铸机上脱模后，具备天然的高温状态，无需额外加热，且模具整形配合机械手易实现高度自动化，符合全自动压铸岛的需求，因此随着一体化压铸技术的发展热模整形应用逐渐增多。其原理是将刚脱模后的尚有150~280 ℃余温的压铸件迅速放入专用整形模具中，通过液压机施加压力并保压一定时间（通常为20~60 s），利用金属材料在较高温度下屈服强度显著降低（铝合金在250 ℃时屈服强度可比室温降低30%~50%）、塑性明显改善的特性，使变形区域发生微量塑性流动，达到校正形状的目的。在模具设计方面，整形模具的上下模芯需根据产品最终形状设计型腔和型面，并考虑一定的回弹补偿量。广东鸿图应用热整形技术为新能源汽车的后地板、一体化前舱等多种零部件提供过模具产品[41-42]。此外也有在整形模具上增加热控制系统的方案，使产品升温，以达到同样的热整形效果，力劲科技和广州鸿图等在该技术领域均有相关专利提出[37，43-44]。

黄志恒等人[45]提到矫形完成后，在保压状态下通过模具内设置的冷却水道通水冷却，使校正后的形状在降温过程中得以固定，形成“热压—保压—冷定”的完整工艺流程。并通过对比试验证明了热矫形+水冷却4 s的条件下，试验件平面度更佳，且该工艺流程可大大减轻因固态自由收缩引起的变形，尤其对大型铸件更为适用。此外还有多篇文献[46-48]也详细解释了水冷定型的作用，在保压过程中铸件内残余应力逐步释放和重新分配，保压结束后进行水冷使校正的形状得以固定。

极氪汽车的电池托盘的生产应用了该技术[47]。

2.2 点对点挤压整形技术

模具整形具有效率高，一致性强，但设计及调试较为复杂，柔性差，而点对点挤压矫形恰好规避了常规模具整形的缺点。该方法的主要核心是“局部离散化”的整形设计思路[46]，通过针对性布置矫形柱或挤压杆，施加挤压力达到整形的效果。葛春东等[49]提出的点对点气液增压整形的方案如图6所示[49]。其结构由气液增压缸、压紧杆安装板、多根压紧杆、定位板和多根支撑柱等组成。其工作原理为：根据零件结构特点在多个容易发生变形的位置分别设置独立的压紧杆和对应的支撑柱；取件机械手将切边完成的零件放置

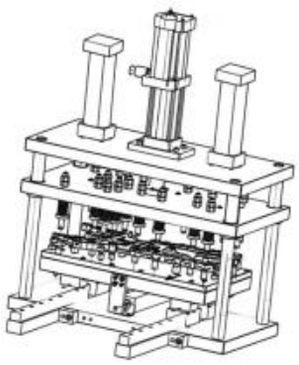
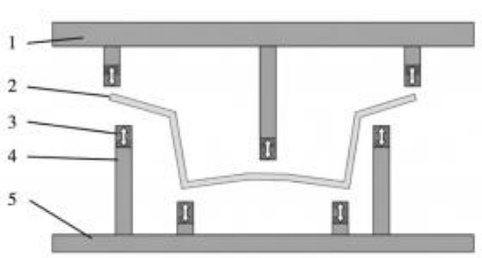


图6 点对点挤压整形方案图

Fig. 6 Point-to-point squeeze sizing scheme

于定位板上；传感器检测到位后，控制定位板气缸将其推入预定位置；气液增压缸带动压紧杆下压，各点同步进行挤压整形，保压后完成整形。各压紧杆的高度和压紧力可根据对应部位的变形量独立调节，实现差异化的精准校正。徐旺等人[50]在切边模中也提到了类似整形方法，在切边模中增加整形柱，在合模力的作用下对压铸件进行静压整形，静压变形量在2 mm内整形，平面度可控制在0.1~0.6 mm范围内。类似结构也有较多的应用案例，广东鸿图[51]公开的矫形模是标准的“上压紧柱—下支撑柱—测距传感器—控制器”结构，每个点位可以独立检测、独立压紧；力劲科技[37]的热态多点支撑整形设备，主要针对电池托盘类压铸件；宁波赛维达[52]的侧向多点挤压整形模具主要针对具有弧形和两端倾斜的铝合金铸件。

国外学者 Park等[53]也提出了多针整形机，如图7所示[53]。该结构包括上模、下模，两者固定不动，在上模和下模上分别设置有多个校直针（straightening pins），每个针可独立控制行程（stroke），针的顶端可以是圆柱形、半球形或者与压铸件匹配的几何形状。矫直时，零件放置在上下针之间，通过上针和下针对向施压来校正变形。其多针结构可以适应不同形状零件的矫正。此外该学者还给出了计算及控制多针整形机的算法。



1. 上模 2. 被矫正件 3. 校正顶端 4. 校正针组件 5. 下模

图7 多针整形机示意图

Fig.7 Multi-pin straightening machine schematic

Christian等[54]提出了一种脱模冷却与点对点挤压整形结合的方法。该方法在铸件从压铸模具中取出后，立即将其送入喷淋冷却站，通过固定支撑和固定压头对铸件进行夹持定位，再利用整形压缸驱动整形冲头将铸件压向可调整形支撑面，使铸件在仍处于热态时完成尺寸校正。铸件在保持整形状态下接受冷却液喷淋，使校正后的形状在冷却过程中得到稳定。该方法的特点是同一工序，利用铸件热态塑性降低整形载荷，并可根据后续热处理变形趋势进行过矫或预补偿，从而达到整形矫正的目的。

2.3 模内补偿整形技术

压铸模修正补偿技术[55]是一种从源头减少压铸件变形的技术方法，其原理是通过逆向补偿的方式消除因压铸模热变形和铸件收缩引起的尺寸偏差，使压铸件在脱模变形后刚好达到所需形状尺寸。该方法利用3D扫描技术获取初始压铸模生产的压铸件的实际形状数据，将扫描数据与产品CAD数据进行配准和对比，计算各部位的变形量和偏差方向，根据变形量对压铸模CAD数据进行反向补偿修正。对于外凸变形的区域增加模具型腔深度，对于内凹变形的区域减少型腔深度，使修正后的模具生产的铸件在变形后恰好达到目标尺寸。修正后的模具数据可直接用于模具加工或局部修模。研究验证表明，通过3D扫描和CAD数据对比，可准确估计变形量并修正压铸模具，修正后可显著提高铸件平面度和圆度。

有异曲同工之妙的还有夏天等人[56]在论文中提出了集群局部挤压技术，在压铸件凝固末期，针对压铸件的易变形位置设置液压油缸驱动的挤压销对薄壁位置强制补缩，实现局部致密化与变形控制。孙彦兵[25]在论文中提到基于仿真的模具回弹补偿法，采用动力显式和静力隐式算法进行拉延、修边成形仿真和回弹分析，根据分析结果补偿模具型面，避免脱模后回弹影响。同样王秋菊[57]也在论文中提到，回弹补偿的有限元逆算法，通过利用虚位移方程计算仿真结果与目标轮廓之间的形状误差反向调整模具型面。此外还有利用材料在冷却收缩引发变形的作用机理去控制变形的方法，Alireza等[36]提出的受控非均匀冷却方法，利用热变形和自适应喷淋冷却系统实现局部冷却，以抵消和控制残余应力和几何偏差。

2.4 其他整形技术

整形和消除应力集中技术发展已久，还有很多应用较少或未被应用在压铸后处理中的技术。例如通过火焰、激光等手段[46，58]对材料进行局部加热，利用材料在高温条件下易被整形的属性，对铸件局部加热后进行外力校正，该方法主要是应用在后期形状修复中。此外还可以通过振动和外力挤压配合的方式解决形变问题[59-60]，可以降低材料整形后的应力和回弹，但这些技术目前未被规模化应用在压铸件的生产中。形状简单，尺寸要求较低的薄壁件也常应用常温人工敲击整形的方法[61]，通过利用铜锤等工具敲击以矫正形状并释放应力，但薄壁铸件易出现裂纹，导致产品报废，且手工效率低，产品质量差[62]，因此主要用于试制件或少量修形。

2.5 各整形技术的对比

压铸件在生产中容易产生翘曲、平面度超差、孔位偏移等变形问题，尤其是尺寸大、壁厚不均、刚性弱的压铸件，变形控制难度极高。现有整形技术已形成从人工常温整形、局部加热整形、在线热整形、模压整形，到点对点挤压、多点智能整形、模具反补偿等多种方案。为便于对比分析，总结了各类典型整形技术的原理、优缺点及适用场景，如表2所示。

3 切边整形一体化技术

在传统工艺中，切边和整形这两道工序需要分别在切边机和整形机上独立完成，如今的工厂对成本控制和时间节拍要求较高，因此切边整形一体化正在快速发展[63]。其核心原理是将切边与整形两道工序合并在同一工位中完成，通过结构创新和时序设计，实现“一次定位、同步完成”，从而提高生产效率、减少设备投入、消除重复定位误差。

3.1 模内切边整形复合技术

模具功能单一、整合度低，是导致压铸件工艺步骤多的主要原因，不仅导致所需设备多、成本高，且各工艺间还需增加中间工序来过渡，导致加工过程和加工精度无法保证。因此徐旺等人[50]提出的设计方案（如图8所示[50]），其工作原理是：上模整体下行，随形压板首先接触压铸件并施加预压力将其压紧，上模继续下行，上冲切刃口与下冲切刃口配合完成对浇道

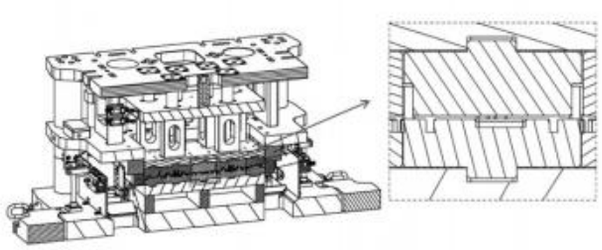


图8 模内切边整形复合设计方案图

Fig. 8 In-die trimming & shaping combined design scheme

表2 压铸件各整形技术的对比
Tab. 2 Comparison of various shaping technologies for the die castings

整形技术	优点	缺点	适用场景	应用程度
模具热整形	效率较高；矫形力小；有助于降低应力集中和疲劳损伤；结合水冷可降低变形回弹	需专用压力机和模具，投入高；对时间窗口、温度、保压和冷却时间敏感；水冷可能带来防锈问题；额外控温需要更多结构和能耗	适用于对平面度要求高、变形量中小、产量较大的产品；适合压铸岛内整形，可充分利用脱模后的余热	高
模具冷整形（常温）	效率高；工艺简单、设备成本相对低；不需要加热和冷却系统；尺寸一致性稳定	需专用压力机和模具，投入较高；压铸件常温塑性有限，变形量过大时易开裂或回弹；对复杂薄壁件易产生压痕、局部应力集中	变形量小、结构相对简单、材料塑性较好的压铸件；批量稳定、需低成本修正的平面度或局部翘曲问题	中上
点对点整形	效率高；针对性强；可调矫形量；结合闭环控制系统可实现精准可控矫形	依赖前期对变形位置的识别；只能修正布点覆盖区域，对大面积连续翘曲不如整体模压；点位压力过大可能产生局部压痕、应力集中或二次变形	局部翘曲、孔位附近、筋位附近、安装面局部超差；切边整形结合；变形模式稳定的中大批量压铸件	中上
模内补偿整形	减少工序，节拍快；脱模前控制变形，减少重复定位误差；可在产生变形的工序中同步抑制变形；适合自动化连续生产	模具设计复杂，前期调试工作量大；补偿量通常针对稳定变形，若铸件批次波动大，效果会下降	适合薄壁件、切边易变形件、切边整形一体化模具；适合压铸岛全自动化生产线	中
局部加热（火焰、激光等）	可降低矫形力，适合常温难以压回的局部弯曲；设备投入低；对局部厚壁区、杆状或半环状变形有一定灵活性	加热温度、加热范围、施力方向难以稳定控制；局部温差可能引入新应力；温度过低或施力不当容易裂纹、断裂；自动化程度低	局部明显弯曲、常温矫形困难的铸件；试制、返修或小批量产品	中下
振动/超声辅助整形	有助于降低残余应力、减少回弹，提高尺寸稳定性；对疲劳敏感区域还有一定表面强化作用；相比单纯强压或锤击，更不容易产生明显机械损伤	对频率、振幅、作用时间、夹持方式敏感；设备和工艺验证要求较高，目前在压铸件量产后处理中的成熟度低	异形壳体、矫形后易回弹件、残余应力较大的压铸件；更适合作为模具冷矫形、模具热矫形、点对点挤压后的辅助工艺，而不是独立主矫形工艺	低
人工敲击	投入最低，灵活性最高；适合临时返修、样件调试、小批量试制；不需要开发复杂模具	一致性差，强依赖工人经验；容易敲伤、压伤、裂纹、过矫或回弹；效率低、劳动强度大、噪声大	样件、试制、返修；小范围、轻微变形	中下

和飞边等的冲切；当上冲切刃口走完冲切行程后，合模力通过整形柱传递至顶出板，再经连接块和固定板传递至随形压板，对压铸件进行持续一定时间的静压整形，保压完成后开模取出产品。其整形结构为上模座板上设置多个整形柱，整形柱位于顶出板的上方，随形压板和随形支撑板均采用区块拼接形式，如图8所示，各随形压块与固定板之间设有上整形垫片，各随形支撑块与固定块之间设有下整形垫片。通过增减垫片数量可对各局部区域的整形量进行差异化微调，以实现在切边过程中得到最佳的整形效果。

易曼丽等人[62]也提出了类似切边整形模具的方案，其包括上模和下模，上模设有刃口、支撑板和多个弹簧整形压头，下模设有支撑板、多个整形块和下刃口。工作原理是整形压头在弹簧力的作用下先接触到产品进行整形，上模继续合模，上下刃口切掉渣包等多余部分，即完成切边整形工作。广东鸿图[38]为某国产新能源车型的一体化前舱压铸件提供了具有冲模与整形复合功能的生产设备，有效提升了产品两侧轮罩的变形控制；长安阿维塔的后地板和前舱等件的生产模具在切边模中添加了挤压整形功能，显著提升了生产效率。

胡磊等人[63]提出了一种集成切边、冲孔、整形的复合模具，该模具集成了切边刀口、整形冲头、冲孔冲头，并且在整形冲头上设置了弹簧，使其具有较长的挤压整形时间，在整形的同时进行切边和冲孔，这些冲头和刀口具有可拆卸的功能，使其具有更好的适应性。梁朝坚等人[19]也提到切边、整形和冲孔由一套模具完成的技术，不同之处在于模具内部设有独立的模腔，以便于后期根据产品的变形量对每一模腔进行调整，以满足产品的设计要求。张明等人[64]也提出一

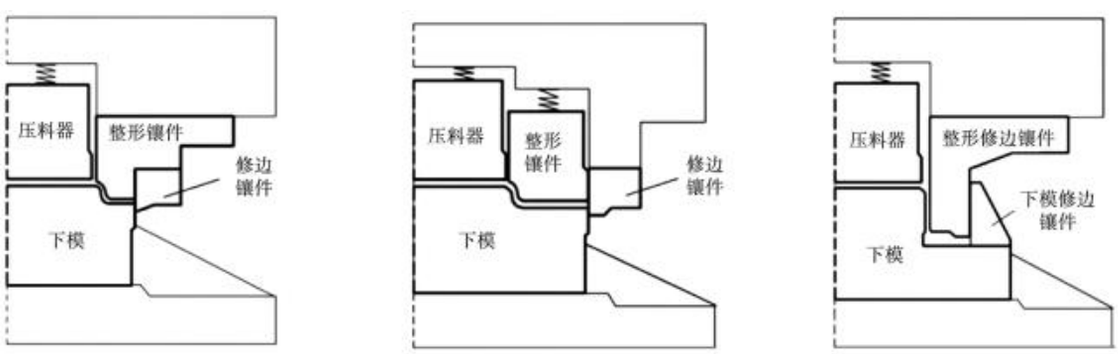
种针对铝合金压铸件切边整形一体的清理装置，并说明其方案在切边整形后具有对外排渣功能。

在压铸领域切边整形一体化的应用研究较少，论文等深入研究性文献较少，实际生产应用中主要以切边过程中小范围矫形、反变形控制、防拉伸、防位移变形、辅助清渣、排料、稳定切等为主，缺乏深度应用和闭环控制应用等深入研究。

3.2 冲压件切边整形一体化相关技术

压铸件的切边整形模是冲裁模应用的延伸[19]，因此对冲压领域相关理论的借鉴尤为重要[5]。冲压与压铸是金属成形的两大门类，二者虽成型原理不同，但切边和整形的原理相同，均为剪切分离和塑性变形。

冲压领域已总结出成熟的切边整形复合模结构理论[65-66]，如图9所示[65]。①背负式结构如图9（a），修边镶件和整形镶件以及上模板固连，弹簧为压料块提供压力。其工作原理为：上模下行，压料器作用，修边刃口切除废料，上模继续下行，整形镶件整形，整形完成。模具开模时，整形镶件先于修边镶件回退。②浮动式结构如图9（b）所示，整形镶件通过独立的弹性元件与上模板连接。其工作原理为：上模下行，压料器作用，整形镶件整形，整形完成，整形镶件充当修边压料器，上模继续下行，修边镶件修边，切边完成。即工艺顺序为先整形后切边。该结构适用于刚性较差的零件，不仅能避免修边毛刺，而且大多不需考虑切边整形过程中的材料流入量，但其结构较为复杂，空间分布紧密。③刃口一体式结构如图9（c）所示，上模整形镶件和修边刃口分布在同一镶件的两侧，下模整形区域外端为修边刃口镶件。其工作原理为：上模下行，压料器压料，上模继续下行，修边镶件切除废料，上模行程到达下死点过程中整形逐步完成。该结构简单，没有多余辅助装置，刚性好，可有效避免修边角度限制，但需考虑材料流入量、废料排出等问题。由于修边镶件倒置，修边毛刺方向会与修边区域相反。



（a）背负式结构　　（b）浮动式结构　　（c）刃口一体结构

图9 切边整形复合模结构示意图

Fig. 9 Structure schematic of a compound trimming & shaping die

刃口一体式结构，适用于空间和结构受限的场景，结合压铸件本身具有较接近成品的形状，可设计一体化压铸件的切边整形校正复合模，在压力机的一次行程中完成切边和整形[67]。

4 结论与展望

4.1 结论

切边整形技术作为一体化压铸后处理流程的核心环节，通过汽车、航天等领域的推动，近几年已取得了一定的理论基础和技术成果，但仍处于发展阶段，主要结论如下。

（1）切边技术：切边模是目前一体化压铸中应用较多的技术，其理论基础和工程经验都较为成熟；机器人切边技术，由于机器人的迅猛发展已有较多的理论基础，但工程应用较少；热-机械振动是切边领域的新方法，已在试验阶段证实其效果，未有工程应用；此外还有等离子切割、激光切割、高速锯切以及人工敲击等小范围应用的技术。

（2）整形技术：模具整形技术在压铸件的整形中应用较多，但热模整形技术收到了更多关注，典型的工艺流程是“热压—保压—冷定”；点对点挤压整形技术，通过离散化的思想针对性挤压，以极强适应性和可调性备受偏爱，目前也有较多应用和研究成果；模内修正补偿技术是通过变形补偿的思想从源头控制压铸件的形状，因具有减少工序的巨大优势，正在快速发展，并可能成为未来发展的方向；此外还有火焰、激光、振动和敲击等方式在小范围应用技术。

（3）切边整形一体化技术：已有多人提出模内切边整形复合技术方案，甚至集成了冲孔和清理功能，

但切边整形结合的深入研究和实践经验较少；简述了冲压件中的切边整形复合模结构如背负式设计、浮动式设计、刃口一体化结构。

4.2 展望

随着一体化压铸件向大型化、薄壁化和复杂化方向发展，后处理中的切边与整形工序将不再是彼此独立的简单加工环节，而会逐渐向工序复合化、装备自动化、模具柔性化、尺寸闭环化和工艺智能化方向发展。基于前文对切边整形技术的综述做如下展望。

（1）整形技术将由单一后处理工序，转变为贯穿压铸成形、切边后处理、冷却定形和检测反馈的全过程变形控制技术：在压铸模中通过补偿设计减少初始变形，在切边模中通过随形压紧和局部整形抑制切边释放变形，在冷却工序中通过热态夹持和受控冷却实现定形，并最终结合在线三维检测、机器人柔性整形和数字孪生模型进行闭环修正。

（2）从固定模具向可调、模块化和柔性化装备发展：一体化压铸件产品尺寸大、结构差异明显，传统专用切边模和专用整形模虽然节拍高，但柔性不足、开发成本高。未来切边整形装备需要具备更强的可调能力，例如可调支撑、可换镶块、可调压头和模块化点对点整形单元等。

（3）从尺寸校正向残余应力和服役性能控制发展：切边整形技术未来不应只关注“尺寸是否合格”，还应关注残余应力、疲劳性能和装配稳定性。切边过程会去除浇注系统约束并释放残余应力，整形过程如果压点不合理，也可能引入新的局部应力集中。因此，未来整形工艺需要与材料性能、应力释放、疲劳寿命和后续机加工变形关联起来，形成面向服役性能的后处理控制体系。多点智能矫形、热态整形、振动/超声辅助整形等技术都有可能成为降低残余应力和改善尺寸稳定性的补充手段。

参考文献：

[1] 马鸿祥. 新能源汽车轻量化材料的应用现状与发展趋势分析 [J]. 时代汽车，2025（19）：124–126.

[2] 何廷余，于德水，李东洋，等. 一体化压铸技术的发展历程及应用现状 [J]. 汽车工艺师，2024（7）：60–64.

[3] Wang G G，Weiler J P. Recent developments in high-pressure die-cast magnesium alloys for automotive and future applications [J]. Journal of Magnesium and Alloys，2023，11：78–87.

[4] 乔侠，杨磊，刘双勇. 一体化压铸技术发展与应用研究 [J]. 汽车工艺师，2023（8）：30–33.

[5] AI故事专家集. 各大车企一体化大压铸解析 [EB/OL]. 搜狐网，2024-04-12. https：//www.sohu.com/a/771027301_121124362.

[6] 张传泽，马飞，柴恒辉. 大型车身结构件压铸工艺研究及9 000 t压铸岛开发 [J]. 锻压装备与制造技术，2025，60（3）：13–16.

[7] 潘飞，彭胜，田政方，等. 一体化铝压铸工艺路线在汽车地板中的应用研究 [J]. 汽车工艺与材料，2025（5）：26–30.

[8] 查敏，顾焘，马品奎，等. 轻合金大型一体化结构部件压铸成形技术研究进展 [J]. 特种铸造及有色合金，2024，44（8）：1009–1022.

[9] 但昭学，林韵，万里，等. 一体化压铸成形技术的现状及发展 [J]. 特种铸造及有色合金，2024，44（8）：1023–1031.

[10] 宋永康，郭凯飞，田茂松，等. 压铸工艺研究进展 [J]. 铝加工，2024（6）：8–11.

[11] 黄军，潘武兵，唐晓亮，等. 汽车行业一体化压铸的研究现状与进展 [J]. 大型铸锻件，2025（2）：29–35.

[12] 王健，宋成猛，侯东锋. 一体化车身后地板压铸节拍提升研究 [J]. 特种铸造及有色合金，2026，46（2）：308–312.

[13] 袁静，赵炳华. 切边、清理等后处理工艺对发电机支架压铸件变形的影响 [J]. 特种铸造及有色合金，2010，30（7）：645–648.

[14] 曾庆杰，聂俊毅，孙永明，等. 一体化压铸单元设备解决方案 [J]. 特种铸造及有色合金，2024，44（8）：1062–1066.

[15] Kallas M K. Multi-Directional Unibody Casting Machine for a Vehicle Frame and Associated Methods USA：WO2019143496A [P]. 2019-07-25.

[16] 于德水，何廷余，刘清，等. 浅析一体化压铸技术的关键生产要素 [J]. 汽车工艺师，2024（8）：23–30.

[17] 黄小东，常涛，卫飞龙. 智能压铸单元的设计与研究 [J]. 铸造设备与工艺，2019（6）：48–52.

[18] 谢书中，黄洲，王孝益，等. 浅析自动化压铸单元内各设备对气缸体毛坯质量的影响 [C]// 重庆铸造行业协会，重庆市机械工程学会铸造分会，2016重庆市铸造年会论文集，2016.

[19] 梁朝坚，于莉莉，解英娟. 浅谈切边模在压铸产品上的应用 [C]// 重庆市机械工程学会铸造分会，重庆铸造行业协会，2011重庆市铸造年会论文集，2011.

[20] 宋寿昌，石大春，孙皓，等. 铝合金压铸件切边系统：CN103639388A [P]. 2014-03-19.

[21] 朱孝林. 一种铝合金压铸件的切边模具：CN112008069A [P]. 2020-12-01.

[22] 李元强. 自动化压铸件切边模应用探讨 [C]// 重庆铸造行业协会，重庆市机械工程学会铸造分会，2020重庆市铸造年会论文集，2020.

[23] 王志军，张传海，施静华，等. B180H1天窗顶盖修边碎屑的解决措施 [J]. 精密成形工程，2021（2）：125–128.

[24] Lee J，Kim T H，Jeon S H，et al. Automation of trimming die design inspection by zigzag process between AI and CAD domains [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence，2024，127（B）：107283.

[25] 孙彦兵. 汽车覆盖件模具修边关键问题的研究及其应用 [D]. 哈尔滨：哈尔滨理工大学，2010.

[26] 沈左军. 汽车覆盖件冲裁修边模废料处理方案 [J]. 冲模技术，2008（11）：33–35.

[27] 沈臻. 铝合金铸件毛刺去除加工技术研究 [D]. 秦皇岛：燕山大学，2023.

[28] 李永杰，唐榆坤，唐和雍. 压铸件去毛刺技术 [C]// 重庆铸造行业协会，重庆市机械工程学会铸造分会.2022重庆市铸造年

会论文集，2022.
[29] 伍宝坚，梁汉广，何绍勇，等. 超大型一体化前舱压铸件机加工技术研发及应用 [J]. 特种铸造及有色合金，2025，45（8）：1270–1275.
[30] Onstein I F，Linnerud Å S，Martinsen K，et al.Adaptive tool trajectory generation for robotic deburring using structured light 3D camera sensor [J]. Procedia CIRP，2024，130：885–889.
[31] Alliston Y Z，Mono J E C O，Toronto Y D. Degate robot end-of-arm tool and methods of use：US20210283682A1 [P]. 2021-09-16.
[32] Zhou Z P，Sun Z L，Luo P F. Adaptive robotic deburring of molded parts via 3D vision and tolerance-constrained non-rigid registration [J]. Journal of Manufacturing and Materials Processing，2025，9（9）：103390.
[33] Kandasamy R. Thermomechanical vibration technique for degating of high-pressure die casting component-a numerical study [D]. Jönköping：School of Engineering，Jönköping University，2023.
[34] 李小林，朱宇，夏鸿文，等. 超低速压铸在新能源汽车电机支架制造中的应用 [J]. 特种铸造及有色合金，2026，46（3）：477–480.
[35] Hofer P，Kaschnitz E，Schumacher P. Simulation of distortion and residual stress in high pressure die casting-modelling and experiments [J]. IOP Conference Series：Materials Science and Engineering，2012，33（1）：101088.
[36] Alireza E，Udo F，Michael H，et al. A digital twin approach to predict and compensate distortion in a High Pressure Die Casting（HPDC） process chain [J]. Procedia Manufacturing，2020，52：144–149.
[37] 潘玲玲，刘卓铭，陈玉林，等. 一种压铸件热矫形设备：CN222607604U [P]. 2025-03-14.
[38] 黄开城，余亮，赵善庆，等. 一种车身前轮罩搭接面仿形矫形装置及方法：CN118513395A [P]. 2024-08-20.
[39] 高兵，熊明. 镁铝合金制品生产用整形机：CN112024645A [P]. 2020-12-04.
[40] 邓彦超，冯平，李进步，等. 一种矫形模具：CN222999403U [P]. 2025-06-20.
[41] 钟宇毅，黄华，陈诗明，等. 超大型一体化压铸后地板的工艺设计与优化 [J]. 特种铸造及有色合金，2025，45（5）：673–678.
[42] 黄开城，万里，黄志垣，等. 一体化前舱压铸项目开发及应用案例介绍 [J]. 特种铸造及有色合金，2025，45（5）：641–646.
[43] 甘海波，曹锡永，聂锐新，等. 一种基于压铸全自动的热矫形系统及方法：CN115647124A [P]. 2023-01-31.
[44] 余亮，池晓钦，周海军，等. 一种浸泡式的压铸毛坯热态矫形方法及装置：CN103753101A [P]. 2014-04-30.
[45] 黄志垣，万里，张百在，等. 铝合金压铸件热矫形技术的开发与应用 [J]. 特种铸造及有色合金，2011，31（8）：731–733.
[46] 刘健. AZ91D镁合金超薄笔记本电脑外壳模压矫形研究 [D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2020.
[47] 侯东锋，王健，宋成猛，等. 大型一体化压铸岛周边自动化设计与实践 [J]. 铸造，2025，74（6）：794–800.
[48] 戴天豪. 车身一体化压铸单元的后处理设备及布置 [J]. 铸造设备与工艺，2025（6）：49–54.
[49] 葛春东，李静，李宗意，等. 铝合金压铸件整形系统：CN110253208A [P]. 2019-09-20.
[50] 徐旺，蔡云杰，金如鼎，等. 压铸件切边模：CN112605233A [P]. 2021-04-06.
[51] 杨放，王科，廖伟平，等. 一种用于铸件的矫形装置：CN116550803A [P]. 2023-08-08.
[52] 李进步，任赛良，邓彦超，等. 一种用于新能源汽车铝件的矫形模具：CN221109469U [P]. 2024-06-11.
[53] Park D，Park J，Kim N. A method for straightening distorted giga-cast large thin-walled components [J]. Materials，2024，17（10）：2241.
[54] Christian H，Martin K，Jürgen L，et al. Helmut meindl. maschine und verfahren zum behandeln von gussbauteilen：DE102013216435A1 [P]. 2015-02-26.
[55] Seno T，Ohtake Y，Kikuchi Y，et al. 3D scanning based mold correction for planar and cylindrical parts in aluminum die casting [J]. Journal of Computational Design and Engineering，2015，2（2）：96–104.
[56] 夏天，吴时雨. 新能源汽车底盘副车架一体化压铸技术研发与应用 [J]. 铸造，2024，73（12）：1751–1756.
[57] 王秋菊. 三维修边线的精确预示算法研究 [D]. 南京：南京航空航天大学，2012.
[58] Maati A，Pouzols V，Tabourot L，et al. Numerical simulation of spring back during an operation of V-Bending，application to titanium and aluminum sheets [J]. Advanced Materials Research，2013，698：69–78.
[59] Yang J，Liu B，Shu D，et al. Vehicle giga-casting Al alloys technologies，applications，and beyond [J]. Journal of Alloys and Compounds，2025，1013：178552.
[60] 马鸣龙，张奎，钟晨，等. 一种消除镁合金变形加工材残余应力的方法：CN114395743A [P]. 2022-04-26.
[61] 张保吉，赵玉香. 铸件变形矫正的方法 [J]. 技术研发，2010，17：54–55.
[62] 易曼丽，季陆，文杰，等. 一种新能源汽车薄壁铸件的整形模具及其冲切工艺：CN115971333A [P]. 2023-04-18.
[63] 胡磊，章伟，高凤强，等. 一种集成切边、冲孔、整形的复合模具：CN119456829A [P]. 20250207.
[64] 张明，钱运亮，李远超，等. 一种切边、整形一体的清理装置：CN113369365B [P]. 2023-10-03.
[65] 周厚保，周铁军. 汽车覆盖件切边整形复合模技术应用 [J]. 模具工业，2018，44（1）：26–29.
[66] 谭荣贵. 切边整形复合型刀块在汽车模具上的应用 [J]. 模具制造，2021，21（9）：12–15.
[67] 金曼曼. 连杆切边冲孔校正复合模 [J]. 模具工业，2000，26（3）：20–21.

（编辑：刘东辉，ldh@foundryworld.com）