

数字化技术在高端铸件研制中的应用

原晓雷 薛蕊莉

宁夏共享集团股份有限公司

前言：随着高端铸件需求的增长、产品更新换代的加快以及先进制造技术发展等，传统串行的铸件产品研制方式的不足已经显现出来：周期长、成本高，竞争力不足。如何快速地研制新产品是未来企业核心竞争力的主要体现。本文主要介绍一种新型的铸造产品研制方式—虚拟铸造技术+3DP 快速成形技术，并用具体产品的研发实践说明新型铸造产品研发模式可极大地提高产品研发效率，降低产品研发成本。

1、铸造技术发展以及对高端铸件研制技术的需求

近 30 年，世界铸造技术发生了巨大的变化，随着人类生活环境的要求越来越高、科学技术日新月异的发展，促使制造业和铸造技术不断进步，铸造发展需要先进的铸造技术，如大型的铸件成形技术、轻合金成形技术、增量制造技术、粉末冶金成形技术，高温合金凝固技术复杂结构件精密成型技术。

综合国内外发展情况，铸造技术发展的总趋势是：

- 重大装备需求凸显，铸造技术向大型高端、特高参数零件成型方向发展；
- 铸造部件向轻量化、精确化、强韧化和复合一体化的方向发展；
- 开发应用高精度、近净成形铸造技术；
- 开发应用先进的轻合金、高温合金精密铸造技术；
- 铸造过程数字化、信息化、智能化技术应用；
- 绿色铸造技术。

重大装备对高端复杂铸件的需求凸显。火电机组将以（600℃ /25MPa）及更高温度的超超临界机组为主，蒸汽参数高，高温零部件工作环境恶化，要求高性能更好的高温零部件新材料的开发应用是超超临界机组进一步发展的关键之一；核电将以百万千瓦级以上的三代核电为主，新一代核电设备对铸件提出了“大型化、一体化和高性能等苛刻要求；水电将以混流式 70 万千瓦及以上机组和用于抽水蓄能的轴流机组为主；电力、石油和冶金等领域装备超常工况条件下（大型化、特高参数）的零件形成发展方向。

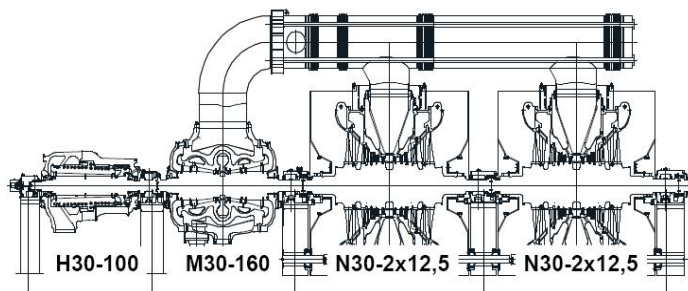


图1 火电机组

为了提高汽车运行性能和节约能源，汽车铸件正向轻量化、精确化、强韧化、复合化和环保化方面发展。铸件轻量化一方面是发展先进的材料技术，另一方面是减薄壁厚、设计多零件组合铸件等先进铸造工艺技术。

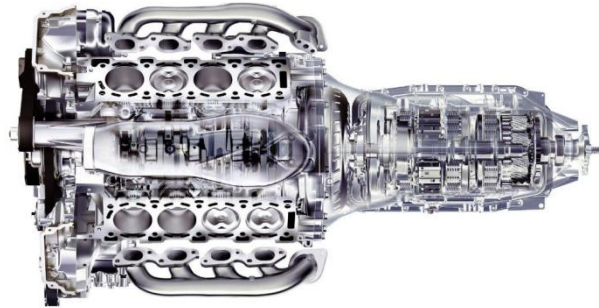


图2 汽车发动机

高性能航空发动机关键制造技术正向轻量化、整体化、精密化制造，发动机零部件铸造技术向先进制造工艺以及信息技术与制造技术相结合的方向发展。

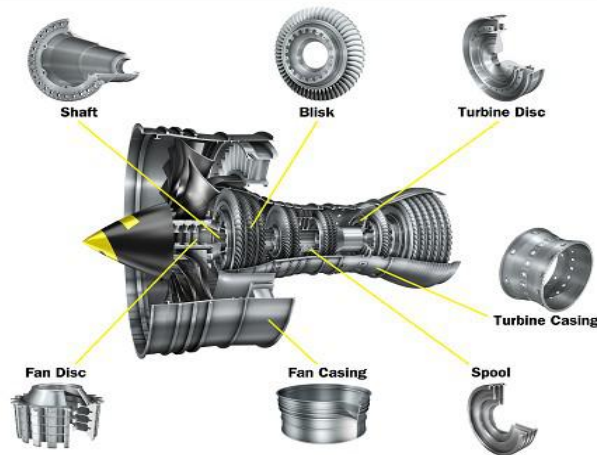


图3 航空发动机

2、新型铸造产品研制模式— 虚拟铸造技术+3DP 快速成形技术

传统铸造产品研制采用的是串行工程模式，即首先由设计部门设计产品、产生工程文件（图纸、规范和技术说明等），然后由生产部门消化产品文件，再设计生成生产文件（铸造工艺、模具工装文件、加工工艺等），并组织生产资源、安排试制生产，质检部门依据有关技术要求安排检验。铸件研制的每一阶段工作都依赖于前一阶段的完成，并制约后一阶段的进行。由于铸造工艺的复杂性和特殊性，一般需要通过多次试验及工艺优化后，铸件才能达到要求。随着社会发展科技进步，产品更新换代速度的加剧，对铸件的生产效率、尺寸精度、表面和内在质量等要求越来越高，铸造企业的竞争压力与日俱增，传统铸造的研制、生产模式存在的问题就凸显出来：

（1）传统的产品设计、工艺设计过程和制造过程相分离，使得从设计到铸件定型需要大量的反复试验、修改；

(2) 铸造工艺的定型是一个反复修改、实验的过程，依靠“经验+试验”方法制定铸造工艺，需要消耗大量的成本和时间；

(3) 生产工序繁复、流程长，工艺装备复杂，模具庞杂且配备调度难度大，模具更改工作量大。

这些问题成为新产品研制的最大障碍，迫切需要采用新的产品研制开发模式和技术，数字化先进制造成形技术—虚拟铸造技术+3DP 快速成形技术在铸件研制及生产中应运而生。

“虚拟铸造技术+3DP 快速成形技术”与传统铸造技术相比，更加重视技术的“集成”与工艺的“并行”，它集成了 CAD/CAE/CAM/增材制造技术等技术。

CAD—在三维 CAD 软件平台上设计出铸造工艺及模具、铸型等的三维实体模型，强调在设计阶段研究分析产品的可造性、可维护性及可靠性等；

CAE—通过模拟仿真技术将充型、凝固过程直观、合理的表现出来，把生产中可能出现的问题提前、及早发现并优化修正，避免在生产过程中多次重复修改工艺方案而浪费时间和成本；

CAM—主要内容是利用三维实体模型数据库控制加工设备以进行模样、芯盒和模具的制造，以及铸件的后期加工处理。具体需要完成模具图设计，对模具结构、工艺完整性、标准化、可操作性进行设计，完成模具分块图设计，编制模具加工程序，由加工中心模具制造；

增材制造技术—CAD、CAM 技术可以显著缩短产品及铸造工艺设计周期，但要将 CAD 的三维实体模型转换成模具仍需通过机械加工方可实现，铸件仍然需要通过常规的铸造工艺逐工序制造完成，产品的试制周期仍然较长。增材制造技术作为先进的制造技术，完全摆脱了机械加工的局限，是一种基于离散堆积成型的增材制造技术，集成了计算机、NC、激光和新材料等最新技术而发展起来的先进制造技术，应用于快速制作铸造模具、无模造型，以及直接 3D 打印制造零件。

图 4 为传统铸造与“虚拟铸造技术+3DP 快速成形”工艺路线图对比：

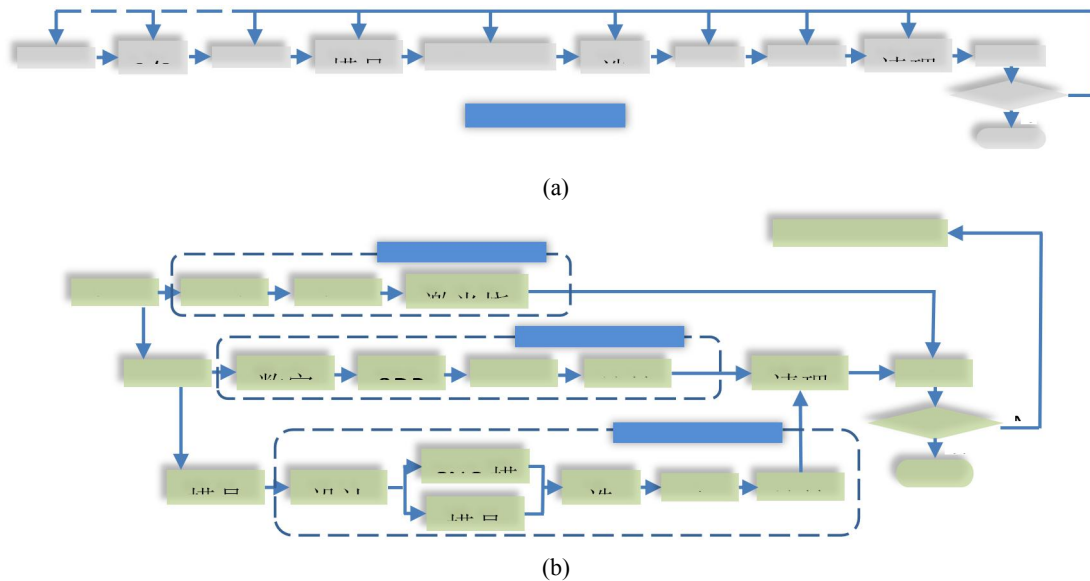


图 4 传统铸造(a)与“虚拟铸造技术+3DP 快速成形”(b)工艺路线图

“**虚拟铸造技术+3DP 快速成形**”是一种新型铸造技术，工艺流程紧凑，技术集成度高，对技术人员综合素质要求比较高，更加以人为本和重视员工的智慧与创造力。在铸造生产“多品种、小批量”、甚至是单件定制生产的大趋势下，“虚拟铸造技术+3DP 快速成形”以其“快、精”等特点，使得生产更加快捷、过程更加可控、浪费更少、效益更高，进而提高铸件质量，缩短研制周期，降低生产成本，提高市场竞争能力。

3、虚拟铸造技术+3DP 快速成形工艺流程

虚拟铸造技术+3DP 快速成形的核心是在并行工程环境下的虚拟铸造技术和增材制造（3D 打印）技术的集成应用。目前虚拟铸造技术主要应用于铸件设计，造型、浇注充型和凝固过程的模拟仿真及产品结果的可视化检测和铸造生产过程的仿真优化 3 个领域。

3.1 虚拟铸造技术

虚拟铸造技术是随着计算机拟实技术出现而发展的一种先进制造技术，它是一种在计算机拟实环境下强调在实际投入原材料生产产品之前，完成铸件产品设计与制造过程的全面模拟仿真，以优化铸造工艺。它将把传统的工艺设计由经验估计变成模型计算，由定性变成定量。铸造工艺模拟及优化是进展较快的内容，凝固温度场模拟及缩孔、缩松的预测已经成熟：现正由宏观模拟走向预测组织及性能的微观模拟阶段。

3.1.1 铸件三维实体设计（CAD）

随着计算机辅助设计（Computer Aided Design，CAD）和计算机辅助工程（Computer Aided Engineering，CAE）在铸造工程的应用，铸件设计人员能够更好地把握铸造本身的诸多问题，能够尽早的在产品初期对其可铸造工艺性进行评估，通过共享设计经验，设计人员能够将铸造经验以及铸造生产商先进的铸造技术综合到产品设计中，以便优化铸件设计。这种在产品设计中充分考虑铸造产品工艺性的并行工程模式，能够大大提高设计效率。

3.1.2 铸造工艺三维实体设计

铸造工艺人员根据顾客提供的图纸，通过 CAD 软件创建一个三维实体模型。将所有的设计工艺信息一同通过 CAD 数据转换的方式创建成三维模型。并进行三维铸造工艺设计，从建立的三维铸造工艺实体抽取数据进行铸造模拟仿真验证并修改工艺设计，然后自动生成相应的铸型、模具图等。下图 5 和图 6 是某内燃机机体的三维铸件图和三维工艺图展示。

铸造 CAD，是整个 CAD/CAE/CAM 集成的基础，为 CAE、CAM 提供共享的模型数据，是工艺流程合理有效的基本保障。常用的 CAD 设计软件有 SolidWorks、ProE、UG、CATIA 等。在 CAD 设计时，需要结合铸件及生产条件的具体情况，科学合理的设计出铸造工艺方案（铸件布局、浇注系统结构等）。由于 CAD 模型数据与 CAE 和 CAM 共享，在模型设计时也要充分考虑到 CAE 和 CAM 的适用性。

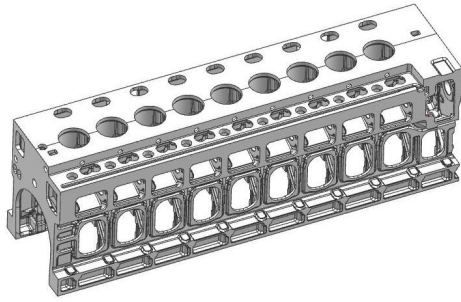


图5 铸件三维模型建立

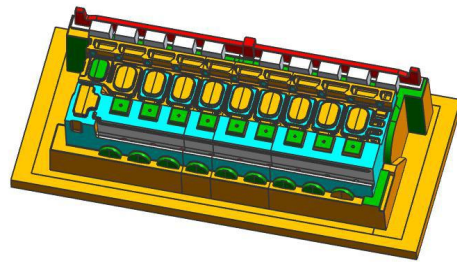


图6 三维铸造工艺设计

3.1.3 铸造数字模拟仿真 (CAE)

CAE 的基本过程是将一个形状复杂的连续体的求解区域分解为有限的形状简单的子区域，即将一个连续体简化为由有限个单元组合的等效组合体。通过将连续体离散化，把求解连续体的场变量（应力、位移、压力和温度等）问题简化为求解有限的单元节点上的场变量值，得出满足工程精度的近似结果来替代对实际结构的分析，以解决很多实际工程需要解决而理论分析又无法解决的复杂问题。CAE 技术是要把工程的各个环节有机地组织起来，其关键就是将有关的信息集成，使其产生并存在于工程的整个生命周期。因此，CAE 系统是一个包括了相关人员、技术、经营管理及信息流和物流的有机集成且优化运行的复杂的系统。

铸造 CAE 模拟仿真技术，可以更直观全面的掌握铸件的充型、凝固过程，并与理论基础和实践经验密切结合，可以更好的预测和评价铸件缩松（孔）、气孔、冷隔、浇不足、热裂、变形等缺陷风险，在此基础上，再对铸造工艺进行优化设计，直到得到满意的结果。国际上众多铸造过程数字模拟技术已经成熟并进入实用化阶段。著名的商品化模拟软件有美国的 ProCAST、德国的 MAGMA、芬兰的 CastCAE、日本的 ADSTEFAN、韩国的 Anycasting 等，我国已经开发的 CAE 商品软件主要有清华大学的 FT-star、华北工学院的 CASTSoft、华中科技大学的华铸 CAE 等。

CAE 仿真模拟的主要过程就是将三维图形转化成模拟文件（通常转化成 STL 文件）导入到 CAE 软件中，根据铸件的结构大小和壁厚进行单元格划分，设置好相关参数后进行模拟，模拟的过程与单元格的多少相关，模拟结束后根据不同的判据进行结果的判定。图 7 是笔者所在公司当前使用的仿真模拟的基本流程。

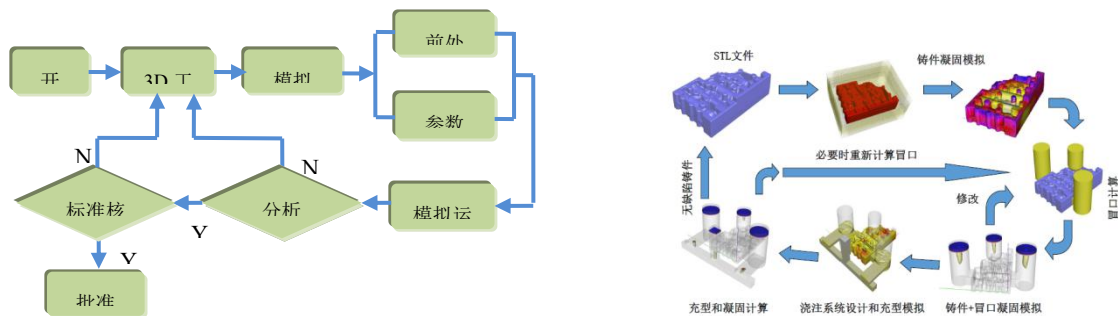


图7 铸造数字仿真模拟工艺流程

CAE 前处理 :将三维工艺 CAD 数据导入到模拟仿真软件中，并输入模拟所需的一些特定的与生产实际的变量参数（如浇注的材料、铸型材料，以及浇注温度等），并进行合理的

网格划分，充型模拟、凝固模拟用时与产品的轮廓尺寸、结构最小壁厚等有关，壁越薄则划分的网格数量越多，则模拟时间越长。

CAE 模拟:通过充型和凝固过程的模拟，依据软件及内部各类判断标准，判断铸造工艺的合理性。例如可以对铸件浇注后的温度场分布、浇注系统冲砂、内浇道流速、浇注系统充满情况、铸件补缩效率、冷铁激冷效果、第一股冷铁水分布位置、铸件夹渣倾向、铸件应力分布、冒口补缩效率、冷隔分布及风险、气体压力变化、过滤网过滤量等内容进行全面的了解。在铸件生产前，预测此类问题，防患于未然，保证产品投产一次性成功。图 8 是 CAE 仿真模拟结果展示。

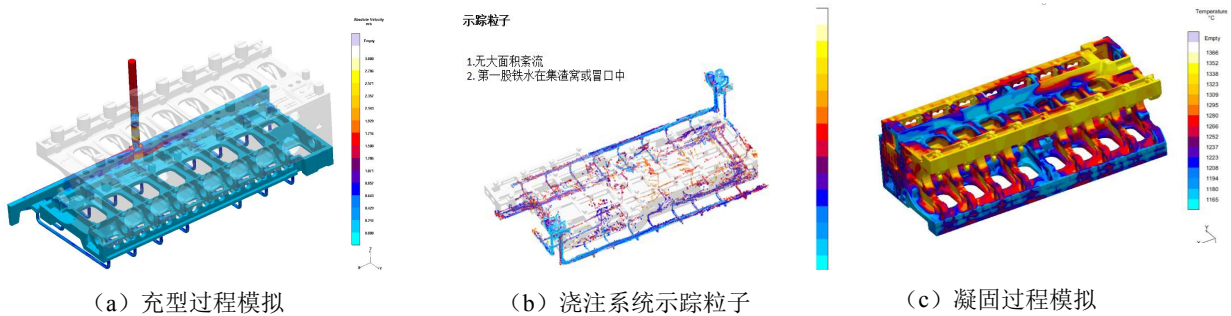


图8 CAE仿真模拟结果

3.1.4 虚拟检验：

通过模拟结果和虚拟划线等检验工艺参数是否全面及合理，是否能够满足顾客质量要求，检验的主要内容有：产品结构、加工量、铸件是否会发生冲砂、缩松、冷隔、裂纹、尺寸不符、性能不符等缺陷。图 9 是凝固模拟的缩松结果示意图（不同的颜色代表缩松可能性的大小）。

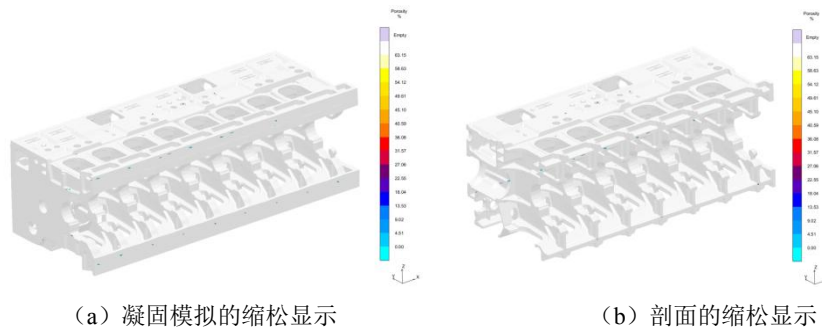


图 9 缩松结果分析

3.1.5 虚拟制造：

虚拟制造阶段进行模拟现场实际操作，从质量、效率、安全、可操作性、成本等方面综合考虑虚拟设计工艺的可操作性，最终形成客观的数据。依据这些数据，对设计的工艺进行工艺改进。具体操作步骤如下：在虚拟环境下模拟产品实际的制芯操作过程；判断芯子在填砂、转运、下芯、定位、出气、施涂等现场操作过程的操作性是否合理；判断芯子是否设计防变形、防粘砂、防损坏、防错位、防呛火、防夹砂措施以及是否设计安全措施；数据统计：对以上问题进行数据统计，并将统计结果反馈至上级进行改进；合箱与造型步骤同制芯操作一致。下图 10 是通过组芯的模拟验证组芯过程是否存在定位、干涉等。

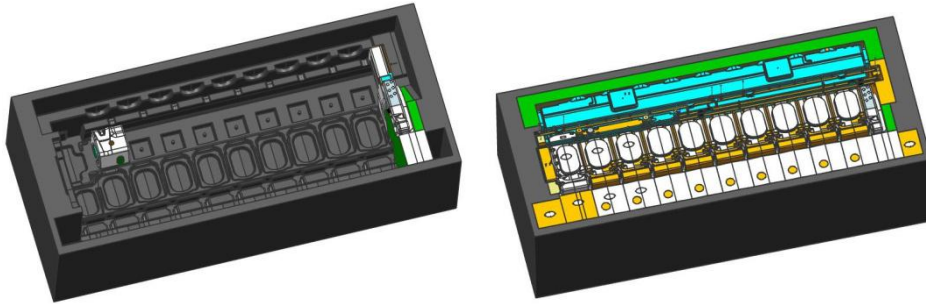


图 10 虚拟制造

3.1.6 Automatic 优化设计

计算机模拟工艺提供了在更少的时间内，以更少的花费，对铸造工艺进行评估，没有问题后再制造工装生产样件。优化流程是，首先用户创建初始的工艺设计，如带浇冒口的铸件三维模型，及相关材料数据。然后选择设计变量，约束和目标函数，运行优化。优化基本包含一系列自动模拟，改变设计变量的值，检查确认没有超过约束，为目标函数寻找最大或者最小值。为了在合理时间内进行优化，每个成功的模拟的时间越短越好，也就是说模拟运算法则必须运行最小数量的计算以获得正确的结果。

例如冒口尺寸的设计：冒口设计大安全系数高，但浪费成本，目标值是保证冒口补缩的前提下，最小的冒口重量。使用这个标准，优化系统改变冒口的形状，对每种形状和尺寸进行分析，软件自动优化至最佳值，与手工设计比较，冒口高度降低 50%，重量减小了 30%，图 11 是 Automatic 优化设计的基本流程。

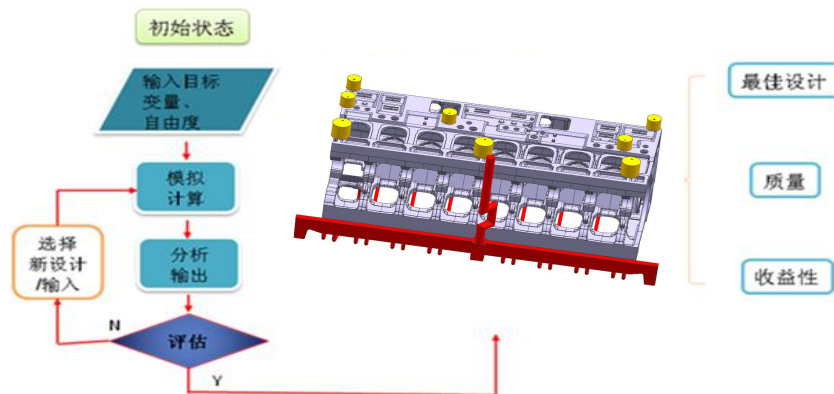


图 11 工艺优化流程

3.2 铸造 CAM

3.2.1 模具制造 CAM

1) 按照三维铸造工艺图转换模具图，完成模具加工图设计 对模具结构、起模斜度、标准化应用，工艺完整性、可操作性进行设计，加工中心按照加工图进行编程加工，进而进行模具制造。

2) 快速原型先进成形技术应用

快速、直接成形技术应用于制作模具、无模造型、直接到铸件直接制造。

3.2.2 铸型的 3D 打印 (CAM)

铸型的三维 CAD 模型设计完成后, 对其进行分层切片, 将切片数据导入 3D 打印机系统。在计算机程序的控制下, 3D 打印机根据设定的加工参数, 控制分层铺粉, 激光器逐层扫描、加热固化或打印机扫描打印粘接剂固化等一系列加工工艺, 直至加工完成或中止。

3.2.3 铸型组装及浇注

砂型 3D 打印完成, 经过简单的处理后即可进行装配。相比于普通砂型铸型, 3D 打印制品的抗压强度可达 4-5MPa, 基本满足复杂形状砂型(铸型)的装配要求, 为复杂形状金属件的制造提供了有力保障。装配完成后, 即可进行浇注, 待铸件凝固冷却后开型, 获得目标铸件。

3.2.4 铸件激光直接打印

采用金属材料和高强度材料直接制造功能零件是 3D 打印的重要发展方向, 主要应用与航空航天和模具制造行业。直接金属功能件成型已成为 3D 打印技术的研究热点, 由于材料、设备成本和运行成本远超出了一般制造企业的承受能力, 其大规模的工业化应用目前还不具备条件。

4、虚拟铸造技术+3DP 快速成形铸造技术实践

根据高端复杂铸件研制的技术要求, 共享集团公司建立了拥有计算机工作站、CAD\CAM\CAE\铸造过程分析软件 MAGMA 等软件、快速成形设备和数控加工中心等的产品研发中心—快速成形中心。

某气缸盖铸件(尺寸: 615×420×290mm, 最小壁厚 8~10mm, 局部较厚; 材质: RuT300)是中速柴油机上关键部件, 属于薄壁多腔承压类复杂铸件, 其结构见图 12。

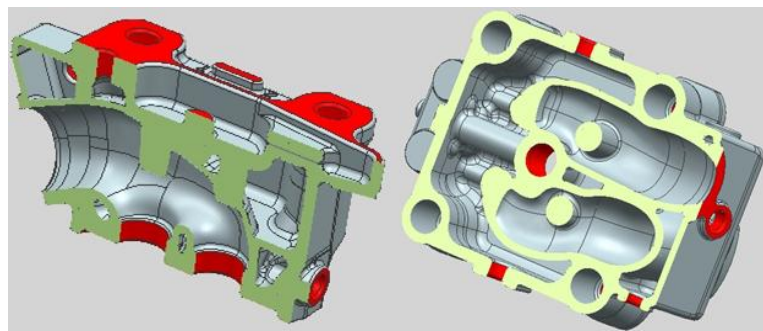


图 12 气缸盖铸件 3D 图

该铸件常规工艺采用的木模、砂型重力铸造, 由于铸件曲面结构复杂, 断面差异大、最小壁厚较薄, 内部的复杂结构全部由砂芯形成, 需要分成至少 30 个砂芯。由于砂芯数量较多, 容易出现尺寸不合、呛火、收缩缺陷等。故导致气缸盖铸件的废品率通常在 10%-30% 之间。3D 打印作为一种无模铸造工艺可以大幅度的减少薄壁复杂件的砂芯数量, 关键砂芯一体化, 可以避免砂芯晃动导致的呛火, 同时也减少了尺寸不合发生的概率。

4.1 生产过程

将传统的砂型铸造技术与先进的 3DP 成型技术集成，进行高难度、高技术、高附加值的高端铸件产品的高效研发生产。通过 CAD/CAE 进行最优化的 3D 铸造工艺设计、包括砂型尺寸、组芯方式、浇注系统形式、冷铁设置、施涂及转运方式、铸造生产过程模拟等。具体研制过程：

4.1.1 使用 UG 软件建立气缸盖的三维实体模型

4.1.2 浇注方案选择

通过充型模拟对比不同浇注系统，选择充型平稳、利于补缩的浇注系统。充型模拟（图 13）显示底注最平稳，顶注次之，侧注最差。而且铸件底部薄、上部厚，顶注的工艺利于补缩。最后选择顶注并优化阻流截面，缩短浇注时间。

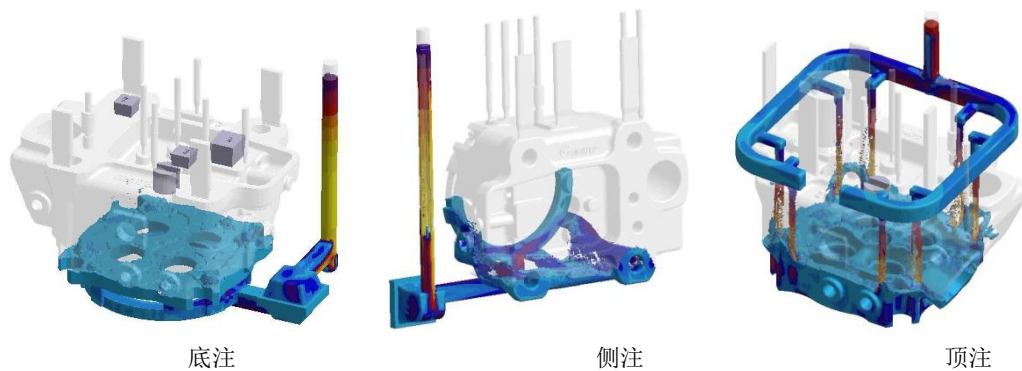


图 13 气缸盖不同浇注方案的模拟

4.1.3 铸造工艺优化设计

通过 MAGMA 模拟优化确定生产工艺参数并建立气缸盖的三维铸造工艺图。浇注系统比例 1:2.2:2.5，内浇口平均流速 0.8m/s，浇注温度 $1380\pm 10^{\circ}\text{C}$ ，浇注时间 13s，顶部厚大部位使用发热冒口进行补缩，燃烧室面设置冷铁。

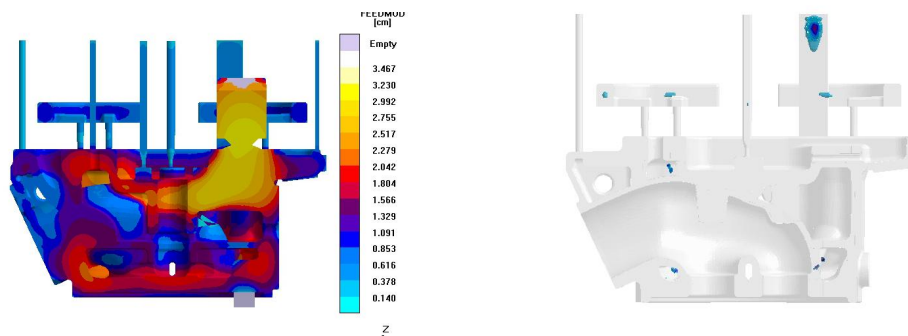


图 14 气缸盖 MAGMA 仿真模拟结果

4.1.4 砂型/芯结构（分块、集成）设计（图 15）

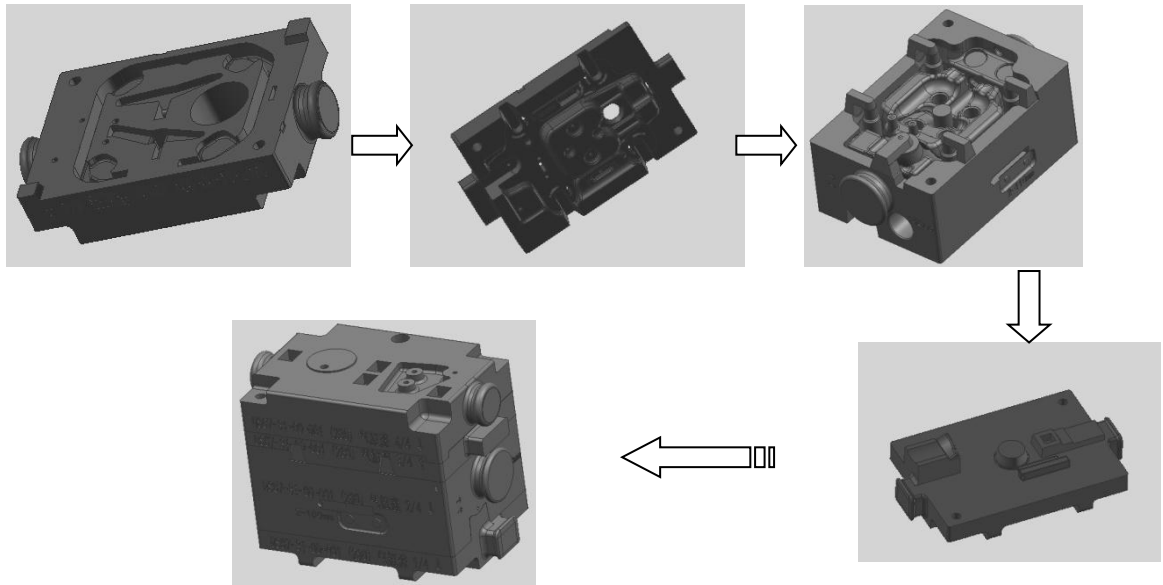
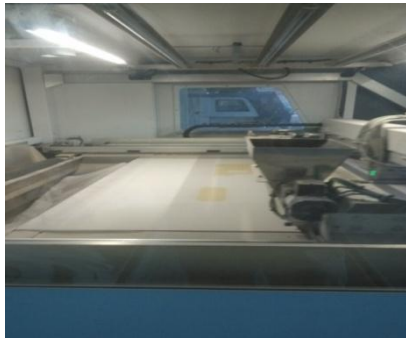


图 15 气缸盖 3D 打印型芯设计

4.1.5 3D 打印铸型芯（图 16）



技术参数	硅砂型号	打印层厚	分辨率	打印速度	铸型抗压强度
硅砂	70/140 目	120-300 μ m	600 dpi	40-100mm/h	\geq 5MPa

图 16 气缸盖型芯 3D 打印过程及技术参数

4.1.6 组芯/型，浇注成形

将打印好的型芯从造型箱中取出后经除砂清理、预表烘干、表面施涂、烘干检验合格后即可组芯成型，经浇注、冷却后开型，除去铸件积砂、浇冒口、钢丸等，方可喷漆、交检、合格入库。



图 17 组芯/合型、浇注成形

4.2 样件试制效率对比

通过直接打印砂型（芯），取消了模具制作过程、简化了铸造造型工艺，降低了铸件研制成本，大大提高新产品研发效率，适用于结构复杂、质量高要求、单件小批量铸件的研制。

铸造模式	铸造工艺设计	模具制作	铸造	清理	检验入库	总计
传统有模砂型铸造	5	45	6	2	1	59
虚拟铸造技术 + 3DP 快速成形铸造	5	0	3	1	1	10

5、结论

1.1 传统的铸造开发技术难以适应市场需求，在高端复杂铸件研发生产中采用**虚拟铸造技术+3DP 快速成形技术**是铸造行业转型升级、提升产品开发竞争力的重要途径。

1.2 根据高端复杂铸件研发任务的需求，建立以工作站、通过 CAD\CAM\CAE 与铸造过程分析软件、快速成形设备和数控加工中心等组成的快速成形研发中心，形成新型铸造产品的研发平台。

1.3 结合具体研发任务，在并行工程环境下建立铸件的三维实体模型、对铸件的工艺性进行评估，对铸造工艺设计方案进行数字模拟，并根据模拟结果确定工艺方案、设计铸造模具和铸造工艺装备等。

1.4 作为一项新技术极具发展潜力，增材制造技术（3D 打印技术）与铸造技术紧密结合，实现良性互动与技术集成，充分发挥增材制造技术和铸造技术的核心优势，是其推广应用和提升铸造技术水平的重要途径。

1.5 通过在高端复杂铸件研发中应用**虚拟铸造技术+3DP 快速成形**铸造技术，大幅度降低了铸件产品的研发费用、缩短了试制周期、提高了铸件产品质量。

参考文献

1. 王贵, 宰守宾, 陈冰, 米佳伟.并行工程环境下的复杂铸件开发. 98 上海有色合金及特种铸造国际会议论文集 1998.10 上海
2. 周建新.铸造计算机模拟仿真技术现状及发展趋势 (J).铸造, 2012,(10): 1105-1125.
3. 卢秉恒,李涤尘.增材制造(3D 打印)技术发展.机械制造与自动化, 2013(04):1-4.

（来源：2015 年兴业铸铁技术论坛论文集）

ADI 的特性、生产及应用

曾艺成

(机械科学研究总院, 北京 100044)

1、等温淬火球铁 (ADI) 的几个基本认识及性能特点

1.1 几个基本认识

1) 等温淬火球铁是把健全的球墨铸铁件进行等温热处理, 以获得优异的综合力学性能, 因此其前提是健全的球墨铸铁件。

2) 合金元素对球铁力学性能有重要影响, 但对等温淬火球铁 (ADI) 没影响。等淬的目的就是利用热处理技术改变铸铁的基体组织, 提高力学性能, 节省合金元素。加入合金元素的目的是提高淬透性。

3) 球铁原始基体组织对等淬球铁的力学性能没影响, 但对变形有影响, 因铁素体和珠光体变形量是不一样的, 其线性增长量是铸态基体组织和等温温度的函数 (见图 1)

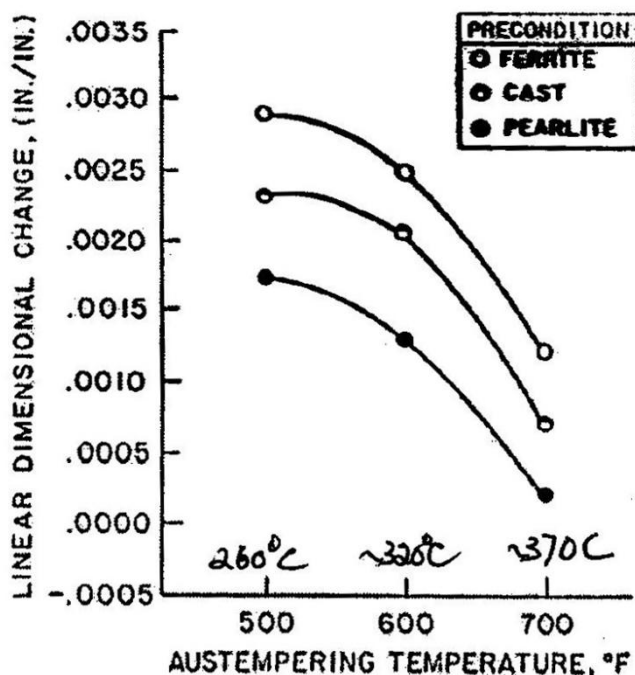


图 1 球铁线性增长量与铸态基体组织和等温温度间的关系

为了提高加工刀具寿命和控制变形, 美国通用汽车公司在生产 ADI 后桥齿轮时, 铸件经退火以获得 100% 的铁素体。

试验表明, 在试样热透后保温 15 分钟, 已足以使基体完全奥氏体化。

4) 球化率、球数对 ADI 冲击、疲劳等动态力学性能影响很大, 强度愈高, 影响愈显著。因此, 对球化率及石墨球数的要求比普通球铁高, 球化率要求 90% 以上 (见表 1、表 2)。

表1 石墨球化分级对稀土球墨铸铁疲劳极限和小能量多冲性能的影响

球化分级力学性能		1级 (>95%)	2级 (>90%)	3级 (>80%)	4级 (>70%)	5级 (>60%)
疲劳极限/MPa		286	274	265	251	222
不同冲击功的冲断次数 ×10 ³	冲击吸收功为2.453 J	8.0	6.05	3.89	2.51	1.02
	冲击吸收功为1.962 J	11.7	10.5	8.8	4.7	0.99
	冲击吸收功为1.472 J	17.7	16.0	15.8	9.8	3.5
	冲击吸收功为0.981 J	94.3	99.0	74.9	29.7	6.66

表2 石墨球大小、球数对等温淬火球墨铸铁弯曲疲劳强度的影响

炉号	500个石墨球中大小分布(%)							平均球径 /×10 ⁻³ mm	球数 /mm ²	奥铁体显微硬度 HV	弯曲疲劳极限 /Mpa
	<0.01 mm	0.01~0.02mm	0.02~0.03mm	0.03~0.04mm	0.04~0.05mm	0.05~0.06mm	>0.06 mm				
63	1	14.7	48	22	14	0.3		28.43	170.69	512	250~260
64	2.2	36.3	42.8	10.2	5.3	1.7	1.5	25.88	172.01	551	280
65	12.8	38.2	39.8	8.5	0.7			19.64	262.08	548	350

5) 等温淬火球铁各牌号主要靠不同等温温度获得, 与化学成分关系不大, 即同一成分球铁用不同等温淬火温度可生产不同牌号ADI。化学成分主要决定于铸件大小, 壁厚和结构。

6) 等温淬火球铁的某些组织也可通过加入合金元素、空气中强化冷却获得, 但因需要加入大量的Ni、Mo、Cu等合金元素, 成本太高且不稳定, 因此不加以讨论, 主要讨论经盐浴等温淬火处理的ADI。

2. 性能特点

等温淬火球墨铸铁具有以下性能特点：

(1) 强度高、塑性好。在同等伸长率情况下，ADI的抗拉强度是普通球铁的2倍,而在同等抗拉强度情况下,伸长率是普通球铁两倍以上,ADI抗拉强度也优于调质处理的碳钢,与低合金钢相当。

(2) 质量轻。表3是一些材料的单位抗拉强度所需零件重量（w/y）。

表3 几种材质的w/y

材料	铝合金 (普通)	铝合金 (高强度)	ADI	普通 球铁	20CrMnTi 调质	ZnAl 合金	普通 锻钢
密度/抗 拉强度	0.022~ 0.095	0.0056	0.0044~ 0.0084	0.010~ 0.018	0.0072	0.017~ 0.011	0.014

(3) 弯曲疲劳强度和接触疲劳强度等动载性能高。旋转弯曲疲劳强度可达400~500MPa,与调质处理低合金钢相当；接触疲劳强度可达1600~2100MPa,比低合金钢氮化处理的接触疲劳强度高。

(4) 吸振性好。ADI由于弹性模量低，加上基体中存在石墨球，能迅速吸收振动并增大噪声阻尼，使部件的运行更安静和平稳。

(5) 极好的耐磨、抗磨性。试验表明，硬度为45~48HRC的等温淬火球铁齿轮，其寿命比具有马氏体组织、硬度为58~62HRC的锻钢齿轮更长。CADI（含碳化物18%）的耐磨性能胜过许多高合金耐磨铸铁（AR），其无缺口冲击韧性则是耐磨铸铁的2~10倍，适宜用于要求优异耐磨性能和足够韧性的场合。

(6) 表面强化效果显著。试验和生产实践均证明，ADI具有很好的表面强化效果，能显著提高构件的疲劳强度。例如2007年11月7日修订的ASTM897M各牌号典型性能中，通过概率50%单齿弯曲疲劳强度喷丸的比不喷丸的提高50%左右（见表4）。

表4 喷丸对单齿弯曲疲劳的影响

球铁等级	750	900	1050	1200	1400	1600
不喷丸（MPa）	325	350	365	350	335	320
喷丸（MPa）	650	700	770	700	665	630

曲轴经圆角滚压后弯曲疲劳强度也显著提高。据美国联合收割机的一项研究报告，型号为202重载货车V-8柴油机ADI曲轴，滚压前后弯曲疲劳强度分别为414MPa和986MPa，提高138%；而普通球铁曲轴滚压后的弯曲疲劳强度只提高50~60%左右。

此外，ADI的力学性能根据等温淬火工艺的不同，可以在较大范围内变化，以满足零件在不同工作条件的要求。

2、如何获得健全的球铁坯件

优质球墨铸铁件是等温淬火球墨铸铁的基础，作为等温淬火球墨铸铁的毛坯件，其要求比一般球墨铸铁要严，主要表现在对金相组织和化学成分上，表5为对金相组织的要求。

表 5 等温淬火球墨铸铁坯的要求

球化率 (%)	球数/ (个/mm ²)	磷共晶+碳化物+缩松 (%)	珠光体/铁素体
>90	>100	<0.5	恒定

2.1 化学成分的确

ADI 碳当量的推荐范围见表 6。

表 6 推荐用于 ADI 的碳当量

截面尺寸/mm	CE (%)
0~13	4.4~4.6
13~51	4.3~4.6
>51	4.3~4.5

化学成分范围建议如下：

C: 3.6±0.2, Si: 2.5±0.2, Mn: <0.3, P: <0.02, S: <0.015, Ti: <0.03, K_I: <1。

球化系数 $K_I=4.4(\%Ti)+2.0(\%As)+2.4(\%Sn)+5.0(\%Sb)+290(\%Pb)+370(\%Bi)+1.6(\%Al)$ 。

一般壁厚大于 19mm 就需考虑加入合金元素，加入合金元素主要是提高淬透性，对等淬后球铁力学性能没什么影响。增加淬透性的常用合金元素是 Cu、Ni 和 Mo。由于价格低，Cu 是首选，当 Cu 量已加到最大值 0.8% 仍达不到所要求的淬透性，则加 Ni，通常 Ni 在 2% 以下。Mo 有很好的淬透性，但它极易偏析，又是强的碳化物形成元素。在晶界形成钼的碳化物，影响性能及加工。

一般来说，在促进淬透性方面，质量分数为 1% 的钼大约是 1.6 倍的锰的作用，而镍与铜的作用分别只有锰作用的 30%。合金元素对 ADI 临界尺寸的影响见图 2。

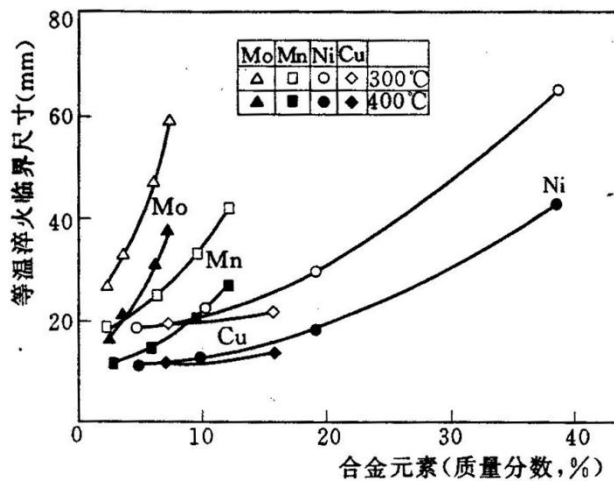


图 2 合金元素对等温淬火临界尺寸的影响

由图 2 可见，不同热处理条件将导致最大断面的临界尺寸发生很大的变化。图中还表明，能否成功地进行奥氏体等温处理，要取决于合金元素（珠光体淬透性）和等温处理温度。

但上图只表示了单一合金元素的影响。而下列公式则包括了合金元素相互间的作用，用它可以衡量加入与不加入合金元素的球墨铸铁淬透性：

$$J_{dp}=2.9 (T_r)^{1/2}+18.2 (Mn) +25.3 (Mo) +6.0 (Cu) +28.6 (Mo \cdot Cu) +38.6 (Mo \cdot Ni) +13.6 (Mn \cdot Ni) +50.9 (Mo \cdot Cu \cdot Ni) -82.2$$

式中， J_{dp} ——临界淬透性距离（珠光体淬透性判据）（mm）；

T_r ——奥氏体化温度（℃）。

合金元素以质量百分数计。

上式是通过试验得出的，它非常出色地表达出各因素之间的相互关系。公式还表明，在改善淬透性方面，少量多元合金元素比大量单元合金元素更加有效。根据试验、生产实际及公式计算不同壁厚需加入合金元素量，见表 7。

表 7 不同壁厚淬透需加入的合金元素量

壁厚 mm	<9	<25	37~50	Φ75	Φ80	Φ84	Φ120	Φ150
加入合金元素%	不需要	0.2Mo	0.35Mo 1.0Cu 或 0.5Mo	0.41Ni 0.38Mo 0.81Cu	1.0Ni 0.25Mo 0.50Cu	1.0Ni 0.25Mo 0.75Cu	1.0Ni 0.36Mo 0.75Cu	1.0Ni 0.36Mo 0.75Cu 中心 5%珠光体

注: Φ150 样块的性能（见表 8）。

表 8 Φ150 样块的性能

试样部位	Rm	A
边部	950MPa	9.7%
中心	895MPa	8.2%

2. 抓好球铁生产中几个主要工艺环节，保证获得高质量的球铁坯件

1) 采用好的原、辅材料，特别是优质铸造生铁和废钢等金属材料

国外球墨铸铁生产中，一直十分重视研究原生铁质量对球墨铸铁性能的影响，选择稳定、合适成份范围的原生铁和废钢是稳定生产高质量球墨铸铁的首要条件。

采用优质铸造生铁和高纯生铁或优质废钢增碳可以保证消除或减少大型球墨铸铁件中心部份的异形石墨，并可提高塑性和韧性。据介绍，英国 60% 的球墨铸铁厂采用高纯生铁制造大断面铸件或铸态铁素体和铸态珠光体球墨铸铁。美国有一半以上的铁素体球墨铸铁采用高纯生铁作金属原材料。

表 9 为国外 ADI 球墨铸铁坯件和优质铁素体球墨铸铁中干扰元素允许的极限含量。

P	S	Sn	Sb	Ti	Al	As	Bi	B	Pb	Se	Te	ΣA
0.02	0.02	0.02	0.002	0.040	0.050	0.02	0.002	0.002	0.002	0.030	0.020	<0.1

铸态铁素体球墨铸铁、大断面球墨铸铁、有低温冲击韧度要求的球墨铸铁及高牌号 ADI 球墨铸铁坯件的干扰元素含量要求更高。

目前我国已有许多铸造生产厂能够稳定供应 $P<0.04\%$ ， $Ti<0.04\%$ 、 $Mn<0.3\%$ ，杂质元素总量 $\Sigma<0.1\%$ 的球墨铸铁用优质生铁，见表 10。

表 10 优质生铁及高纯生铁的化学成份

	P	S	Mn	Sn	Sb	Ti	Al	As	Bi	Pb	Cu	Cr	K1	Px
承德保通	<0.022	0.005	<0.021	<0.00005	<0.0005	0.01	0.00745	0.001	0.00001	<0.0005	0.00285	0.020	0.22	0.53
河北龙凤山	0.018-0.035	0.014-0.017	0.052-0.046	< 0.0005	< 0.0005	0.010-0.015	0.007-0.0058	< 0.0006	< 0.00005	< 0.0005	0.0096-0.0089	0.0094	0.23	0.56
济南庚辰	0.024-0.035	~0.02	≤0.1	< 0.0011	< 0.0003	0.027		≤0.0011	0.0001-0.0002	≤0.0002	0.007	0.003	0.38	0.763
山西建邦	0.018-0.035	0.014	0.06	< 0.0005	0.001	0.019	< 0.005	< 0.0005	< 0.00005	< 0.0005	0.011	0.0052	0.26	0.638
辽宁本溪	0.028-0.038	0.012-0.017	0.06-0.09	0.0006	0.0001	0.027-0.045	< 0.004	0.011	< 0.002	0.004	0.005	0.012	1.13	0.717
辽宁罕王	0.025-0.038	0.08-0.018	0.07-0.08	< 0.0005	0.0005	0.015-0.021	0.005	0.0006	0.002	< 0.0005	0.005	0.0071	0.98	0.683
河南林钢	≤0.038	≤0.02	≤0.1	0.0005	≤0.005	0.02-0.06	< 0.005	< 0.005	0.00005	0.0002	0.005	0.007	0.30	1.0
河北春风	0.031-0.038	0.015-0.020	0.09-0.13	< 0.001	0.001	0.02-0.043	0.002	< 0.001	< 0.0005	0.001-0.004	0.001	0.002	1.57	2.134
河北友利	0.025-0.04	0.02-0.03	0.01-0.015	≤0.0017	≤0.001	0.02-0.03	< 0.005	< 0.002	0.0012	< 0.001	0.0033	0.029	0.98	1.37
河北金丰	0.025-0.028	0.017-0.022	0.05-0.06	< 0.0005	< 0.0005	0.019-0.032	< 0.005	< 0.0005	< 0.00005	< 0.0005	0.0055	0.014	0.32	0.64
山西东诚	0.032-≤0.04	0.028	0.12-0.3	0.0005	0.001	0.047	0.002	0.0005	< 0.001	< 0.0005	0.011	0.003	0.73	1.35
河南合鑫	0.04-0.41	0.014-0.21	0.08-0.092	0.0005	0.0005	0.038-0.040	< 0.005	< 0.005	< 0.001	< 0.0005	0.011	0.0094	0.78	1.14

除生铁外，也可采用优质碳素钢作金属炉料，表 11 为一汽铸造公司用高纯生铁和废钢增碳工艺获得的铁液化学成分，可见两种金属炉料均能获得合乎要求的成分。

表 11 一汽铸造公司奔腾 1.8T 曲轴原铁液化学成分

金属炉料 \ 化学成分	C	Si	Mn	P	S	Cu	Mo	Cr	Ti
高纯生铁	3.67	1.84	0.12	0.017	0.008	0.70	0.22	0.051	<0.008
废钢增碳	3.90	1.90	0.24	0.021	0.003	0.67	0.18	0.023	

2) 获得高温低硫的原铁液

质量不稳定，是妨碍球墨铸铁应用于工作条件更苛刻的零件上的症结所在。球墨铸铁的生产过程较复杂，影响其质量的因素很多，因此要保证球铁质量稳定，首先必须保证主要工艺环节各参数的稳定，重点之一是高温低硫的原铁液质量，例如：要保证球化率及残余镁量稳定，首先要采取预脱硫或其它措施保证原铁液的硫量低及稳定 (<0.015%)。临界残留镁量与原铁液硫量关系见表 12。

表 12 原铁液硫量球化对临界残留镁量影响

原铁液硫量%	处理后硫量%	临界残留镁量%	球化类别
0.004	0.004	0.022~0.024	1~2级
0.03~0.042	0.017~0.02	0.038~0.043	1~2级
0.064~0.073	0.016~0.018	0.051~0.054	1~2级

加入微量稀土元素，可以降低获得 1~2 级球化所需临界残留镁量，只要 0.004~0.010% 的稀土残留量，表 12 中球化临界残留量可相应降到 0.013%、0.028% 和 0.041%。

要获得低且稳定的残留镁量，就必须要求原铁水含硫量低且稳定，而要获得稳定的低硫铁水，除采用低硫生铁、废钢，电炉熔炼外，也可采用炉外脱硫方法。表 13 为几种主要脱硫方法所用脱硫剂、温降及脱硫效果对比。

表 13 主要炉外脱硫方法的温降及脱硫率

脱硫方法	脱硫原理及脱硫剂	温降 (°C)	处理后硫量 (%)	脱硫率 (%)	备注
摇动包	包子放在摇动的框架上，一边做圆周运动，一边形成偏心运动，定时改变运动方向。使铁液出现双回转运动，增加脱硫剂与铁水接触面积。用 CaC ₂ 、CaO 作脱硫剂。	40~70	0.01~0.03	60~80	适于大、中、件处理
机械搅拌	将脱硫剂加入铁水中“T”型搅拌器在铁水中以一定转速旋转，加剧脱硫剂与铁水接触，脱硫剂为 CaO、CaC ₂ 或 苏打	20~40	0.02 以下	60~80	适于中小件
多孔塞气动去硫	脱硫剂加入铁液中，通过包子底部的多孔塞吹入 N ₂ ，使铁液翻动，增加脱硫剂与铁液接触面积。	25~70	0.02 以下	50~70	适于中小件
出铁槽	一面出铁一面在出铁槽加入脱硫剂	20~30	0.02~0.04	40~60	适宜大批量流

除了低硫外，还要保证铁液温度在 1500℃ 以上，这是铁液冶金质量好的重要标志。只有在此温度下，铁液的夹渣、夹杂物才得以清除、净化，这也是我国球墨铸铁韧性指标低于国外先进水平的重要原因之一。采用热风水冷无炉衬冲天炉、冲天炉-电炉双联或中频炉熔炼，是获得高温铁液可靠的办法。

3) 获得球化良好的铁液

(1) 球化剂

镁是很好的球化元素，球化剂应以镁为主，但有一合适的范围，镁量高，易形成氧化夹杂，残留镁量越高，夹杂越严重。因此，在保证球化良好的前提下，残留镁量越低越好。

图 3 为原铁液硫量为 0.004% 时不同镁、稀土含量的石墨形态组织分布图。试验表明，纯镁处理时，Mg 残 $\geq 0.022\%$ 时，可以保证球化；加入极少量稀土，可降低保证球化所需的 Mg 残量。

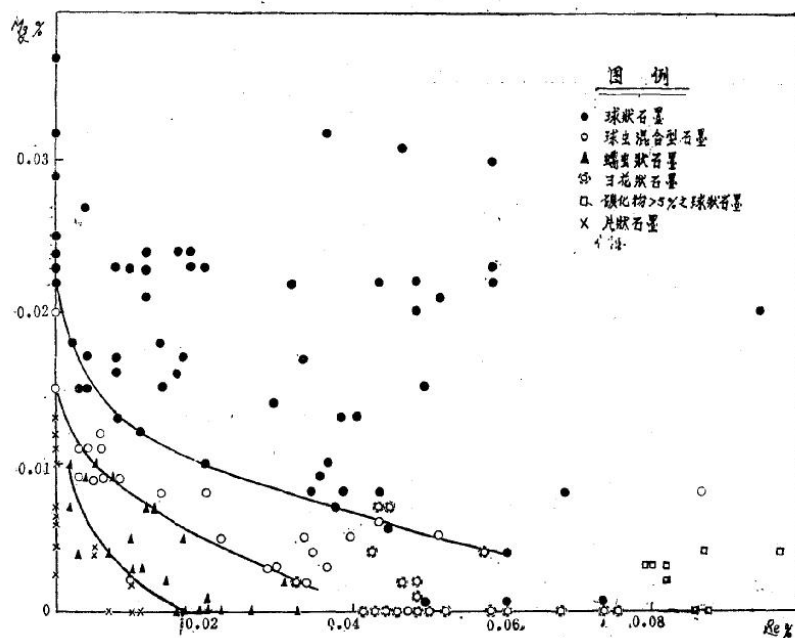


图 3 原铁液硫量为 0.004% 时不同镁、稀土含量的石墨形态组织分布图

在选择球化剂时，要考虑以下因素：

a. 对于采用冲天炉熔制球墨铸铁的厂家，由于铁水含硫量较高，不管用哪种球化剂，球化质量都很不稳定，应采取脱硫措施，使原铁水含硫量 $< 0.015\%$ 。采用低稀土球化剂，此时球化剂加入量较少，球铁质量稳定。

b. 对于电炉熔化，由于温度高、硫量低，也采用低稀土低镁球化剂，残余稀土量控制在 0.01% 以下。

c. 铸态铁素体球墨铸铁，可选用低稀土球化剂，铸态珠光体球铁可选用含铜镍的球化剂，大型珠光体球墨铸铁可选用含微量 Sb 或 Cu 的复合球化剂。

(2) 球化处理

球化处理方法很多，可结合生产球铁件的特点及本厂的具体条件选用。

目前，国内大部分球墨铸铁生产厂均采用冲入法处理，劳动条件差。镁吸收率低且不稳

定，被列为限制使用的球化处理方法，需要改变。建议采用喷吹法、转包法、喂丝法和盖包法，这几种方法镁吸收率较高，劳动条件得到改善、球化效果稳定。

(3) 孕育处理

① 孕育剂

目前国内外应用量最多，应用范围最普遍的孕育剂是 FeSi75 合金，在 FeSi75 合金基础上，附加一些特种元素如 Ba、Bi、Sb、Sn、Y、Sr 等所制得的复合孕育剂，具有显著的孕育效果，且加入量可减少。

② 孕育方法

孕育效果的好坏，孕育方法比孕育剂的作用更大。在生产中常用工艺如下：

a. 倒包孕育：浇注前从运转包倒入浇注包时，添加孕育剂。添加时间越接近浇注时，效果越好，添加孕育剂质量分数一般为 0.1%，粒度一般小于 5mm。

b. 浇口杯孕育：将粒度为 0.2~2mm 的孕育剂放入带拔塞的定量浇口杯内，当铁液在浇口杯中有一定量后拔塞充型，孕育剂添加的质量分数为 0.1~0.2%，适用于大型铸件，见图 4 示意图。

c. 随流孕育：在茶壶式浇包或气压浇注包，侧面装有可控制孕育剂流量的漏斗，通过机械或光电管控制，使漏斗内的孕育剂在浇注期内均匀地随流进入铸型（见图 4 示意图）。孕育剂添加的质量分数为 0.1~0.15%，粒度 20~40 目，此法适用于中小铸件在流水线生产或批量生产。

d. 型内孕育块孕育：见图 4 示意图。孕育剂的主要成分是硅铁，也可附加少量其他元素，如稀土、锰等。把孕育剂破碎成 100 筛号以下，用黏结剂结成固定的形状，也可用铸造方法浇注成孕育块，放在直浇道底部，加入量为铸件质量分数的 0.02%~0.05%。它适用于批量和流水线生产铸态铁素体铁件。

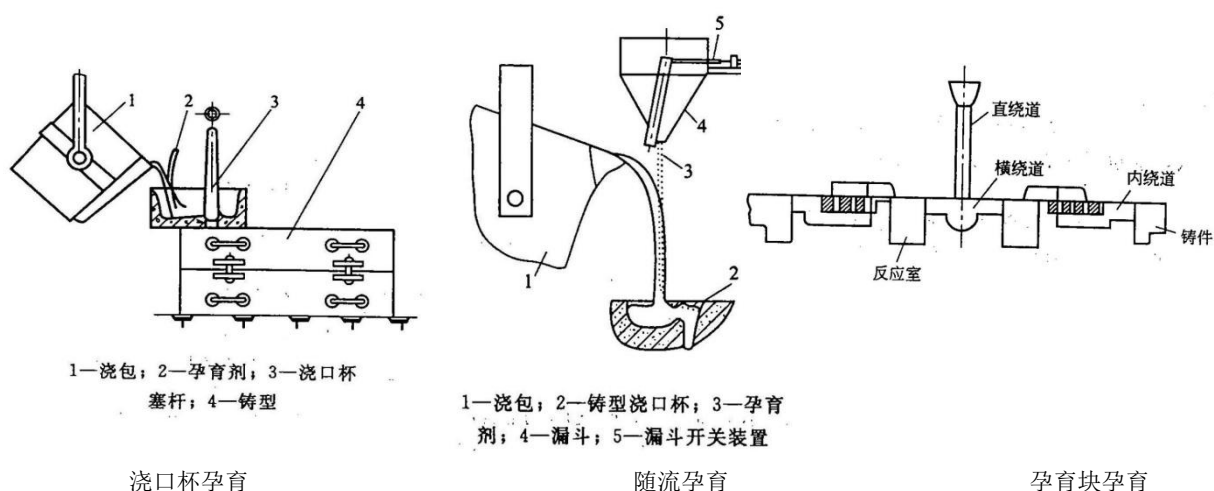


图 4 几种孕育方式示意图

4) 采用具有紧实、精确的铸型及合理的铸造工艺

球墨铸铁凝固时有石墨析出，膨胀量和铸铁液态收缩量大致相近。生产上可以利用这种

特点，采用刚性铸型，避免铸型胀大，获得无缩孔、缩松的铸件。静压、高压、挤压、气冲等高紧实度潮模造型、树脂砂造型、金属型覆砂、壳型填铁丸、水冷金属型等都是比较适合球墨铸铁生产的造型方法，获得广泛应用。此外在铸造工艺的考虑上，因球墨铸件具有糊状凝固的特点，凝固期间液体金属流动困难，冒口的有效补缩距离短，只能起补充液态收缩铁液作用，共晶团间的缩松只能靠石墨化膨胀来填补。因此对于大型复杂、壁厚不均的铸件，为使温度常均匀，大量使用冷铁和内浇口分散进入的工艺。

球墨铸铁处理后，有很多粘渣，容易随铁水流入型腔。应在浇注系统上采用挡渣、撇渣装置。球墨铸铁易氧化，浇注时如出现紊流、飞溅，将生产二次渣，为防止这类铸造缺陷，除控制较低残余镁量外，也在铸造工艺上采取措施，例如，加大浇注系统尺寸，改变各部份尺寸的比例等，使铁水快速、平稳无冲击地充满型腔，达到减少铁水和空气接触时间及接触面的目的。

球墨铸铁容易出现皮下气孔，生产上也应从造型材料上采取措施，防止这类缺陷。例如，增加型砂透气性，降低水份，使用煤粉砂等。

球墨铸铁收缩与造型方法、零件复杂程度有很大关系，变化很大，甚至出现胀大现象。因此，制造模型时，应结合零件的具体结构来选择缩尺比例。

3、等温淬火工艺的确定

3.1 等温淬火工艺

要使等温淬火球墨铸铁具有优异的力学性能，就必须对其等温转变的全过程进行严格控制。等温淬火球墨铸铁的强度和硬度取决于奥氏体化温度和等温温度，合金元素和微区成分偏析则决定了奥氏体等温转变的动力学。为此，要严格控制的热处理工艺参数有：奥氏体化温度和时间及奥氏体等温转变温度和时间。

(1) 奥氏体化温度和时间，奥氏体化温度一般选择在完全奥氏体化温度以上 30~50，多在 850~930℃之间，温度与含硅量关系如表 14 所示。

表 14 等温淬火球墨铸铁最低奥氏体化温度与含硅量的关系

Si(%)	温度 (°C)	Si(%)	温度 (°C)
2.2	810	2.8	847
2.3	815	2.9	854
2.4	821	3.0	861
2.5	827	3.1	866
2.6	833	3.2	875
2.7	840		

其它合金元素也会影响奥氏体化的最低温度，但是它们并不像硅的影响那样大。奥氏体化温度变化范围应控制在±5℃~10℃。

为了降低等温淬火球墨铸铁的硬度，改善其加工性能、近来发展一种双相 ADI。它的奥氏体化温度较低（750℃~850℃），等温淬火前处于铁素体+奥氏体+石墨三相共存区，等温淬火后基体组织为针状铁素体、富碳奥氏体、分散状的先共析铁素体和石墨，ASTM—879M

中牌号 750—500—11 就是这种组织的铸铁，这种牌号的铸铁生产时要求加入较多的合金元素，才能保证其抗拉强度和屈服强度。

图 5 出 Cu-Ni 合金化球墨铸铁奥氏体化温度与等温淬火温度及冲击韧度的关系。

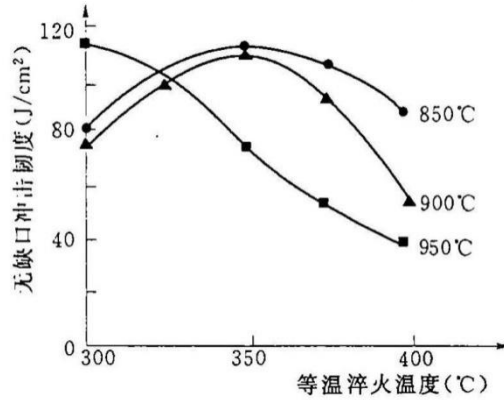


图 5 奥氏体化温度与不同等温转变温度对冲击韧度的影响

至于奥氏体化时间，主要目的是使基体完全转变为奥氏体和使奥氏体达到碳饱和。试验表明，在试样热透后保温 15 分钟，已足以使基体完全奥氏体化。保温时间主要决定于壁厚，一般是每 25mm，保温 1 小时。

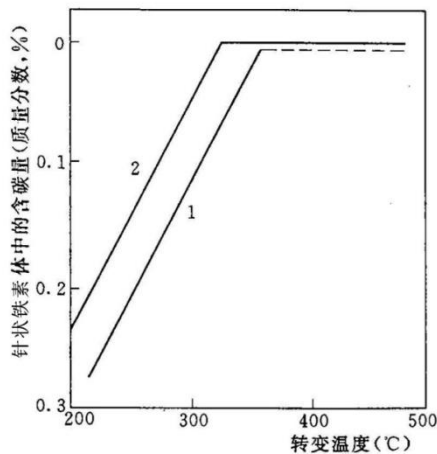
(2) 等温温度和时间

奥氏体等温转变温度和时间直接影响等温淬火球墨铸铁的力学性能。对于每种不同成分的球墨铸铁来说，其奥氏体等温转变过程是不相同的。应具体选择相应的奥氏体等温转变的条件。

在等温转变过程中要求只有针状铁素体析出与生长，没有碳化物析出。这是制定等温处理工艺的关键。

由于合金元素在共晶团边界可呈正偏析或负偏析，从而影响针状铁素体转变的快慢。如促进石墨化元素 Si、Ni、Cu 等富集在共晶团内部，降低了奥氏体中的含碳量，有助于针状铁素体的形成。因此，针状铁素体是在奥氏体晶界和石墨球界面上形核并长大的。

另外，在平衡条件下，高温转变的针状铁素体碳的固溶量很低，随着转变温度降低，铁素体碳的固溶量逐渐增加。因此，在没有析出碳化物的条件下，更容易得到稳定的奥氏体。图 6 是在不同等温转变温度下，碳在针状铁素体中的溶解量。



1—奥氏体化温度 875℃，保温 1h；
2—奥氏体化温度 925℃，保温 1h

图 6 不同等温转变温度下碳在针状铁素体中的溶解量

奥氏体等温淬火后其组织转变如图 7 所示。奥氏体等温转变 (E—G) 使含碳量增至 1.8%~2.2%，这种奥氏体在室温时热力学和力学上都是稳定的。这种高碳奥氏体加上碳过饱和的针状铁素体的混合组织是等温淬火球墨铸铁所期望的组织。如果保温时间不够 (E—F)，此时的奥氏体中含碳量仅 1.2%~1.6%，这种奥氏体在室温时是稳定的，但受力或机械加工时会转变为马氏体。如果铸件在等温盐浴中保温时间现延长 (J—K)，即产生第二阶段的反应。此时高碳奥氏体将分解为更加稳定的铁素体和碳化物，产生类似于钢中的贝氏体。碳化物的出现会降低伸长率和韧性。化学成分、合金元素和球化率、石墨球数等因素对这两个阶段反应有影响。因此，等温转变的时间要取决于工艺条件、铸件壁厚及冶金质量等因素。

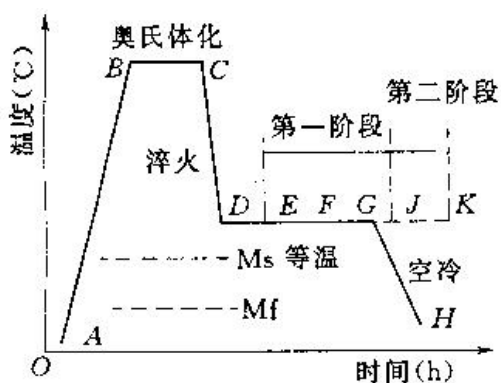


图 7 球墨铸铁奥氏体等温淬火工艺过程示意图

(3) 原始组织的影响

生产实践表明，保温 15 分钟后不同基体组织的球墨铸铁其奥氏体化程度和固溶碳量已趋于一致。因此，只要奥氏体化的时间足够，不同的基体组织并不会引起等温淬火后组织及性能的明显差别，但会影响 ADI 零件的尺寸稳定性。此外，铸态组织中球状石墨的大小和分布，对奥氏体的等温转变和力学性能却有一定的影响，细小、球数多且分布均匀的石墨球

会加速针状铁素体转变，使淬火组织变细，疲劳强度和冲击韧性也较好。

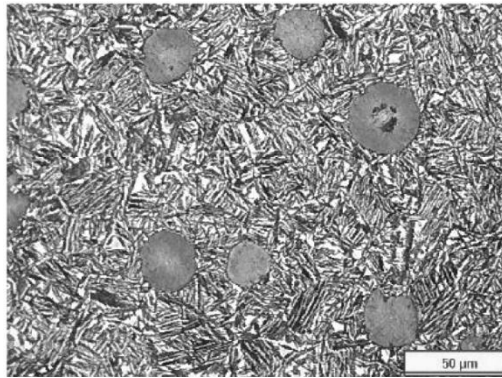
2. 各牌号等温淬火球墨铸铁的等淬温度、时间及金相组织

表 15 为美国 ASTM 各牌号的等温淬火温度与时间的大致关系表

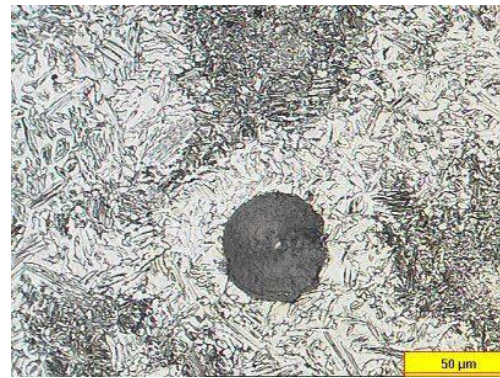
表 15 ASTM 各牌号与等淬温度和时间的关系（参考）

牌号	750-500-11	900-650-09	1050-700-07	1200-850-04	1400-1100-01	1600-1300-00
等淬温度 (°C)	380	370±10	340±10	320±10	290±10	250±10
等淬时间 (分)	45	60	90	90	120	240
富碳奥氏体量%	~22	~35	~25	~15	~10	~5

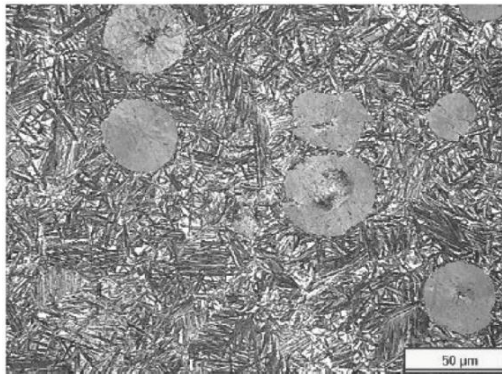
图 8 为 ASTM 各牌号典型金相组织。



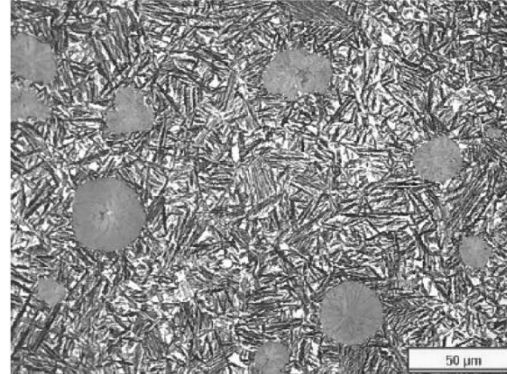
AD750 级（典型的显微组织）



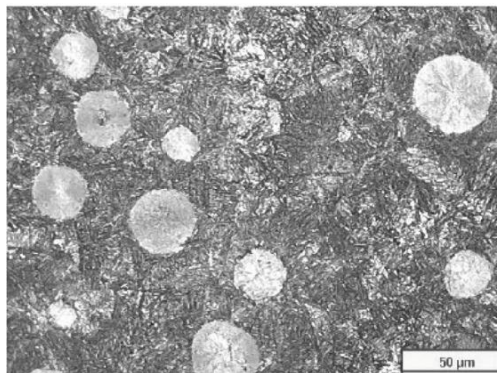
AD900 级（典型的显微组织）



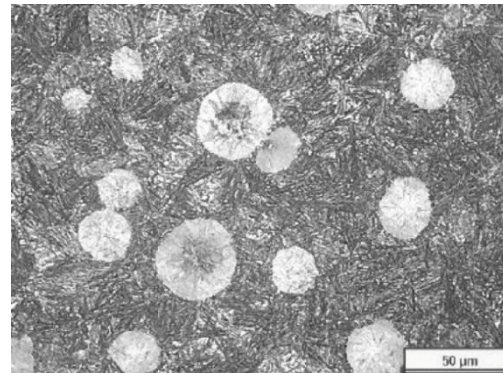
AD1050 级（典型的显微组织）



AD1200 级（典型的显微组织）



AD1400 级（典型的显微组织）



AD1600 级（典型的显微组织）

图 8 ASTM 各牌号典型金相组织

由于黑白金相存在一定的局限性，很难区分针状铁素体和马氏体、游离铁素体和残余奥氏体以及碳化物。彩色金相能使各种相显示出不同的颜色，肉眼容易分辨，它在 ADI 金相检验中有很大的优越性。

图 9 为 AD750 级用化学薄膜法的彩色金相图。图中游离铁素体-黄褐色，奥氏体-白色，针状铁素体-蓝色，石墨-灰色。

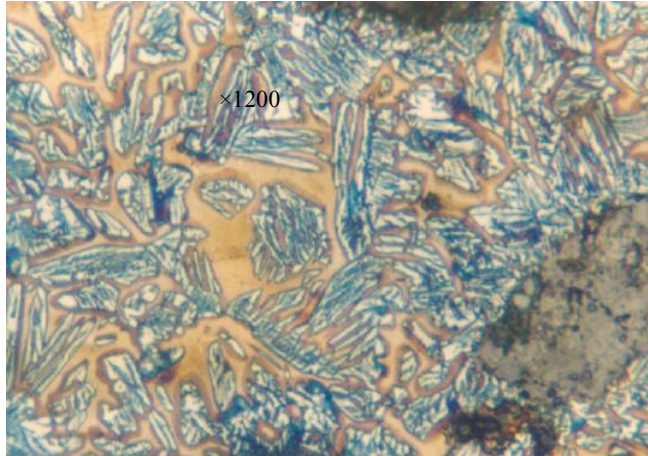


图 9 AD750 级用化学薄膜法的彩色金相图

4、等温淬火球铁的应用

国外 ADI 应用市场中，汽车占了主要位置，约为 ADI 总产量的 45%以上，特别是重型卡车的底盘零件，应用很多。据介绍，美国每辆重型卡车中至少有 500 公斤以上的 ADI 零件。北美市场分配为中重型卡车 25%，轻型汽车 20%，建筑矿山 11%，农机 17%，铁路 12%。经过几十年的生产、应用，积累了丰富的生产经验和数据。ADI 的应用已由一般代用发展到按 ADI 的性能特点及服役条件利用有限元分析等现代设计技术优化产品结构，达到减小零件壁厚、减轻重量、节能节材的目的。据美国 AP 公司介绍，他们公司处理的 ADI 件 95% 是经改进设计的，图 10~图 14 是经改进设计后用 ADI 生产代替铝合金和钢板冲压件的典型例子。



图 10 用 ADI 支架（右）替代了铝合金支架（左）
解决了一款车的舒适性（噪音小）问题

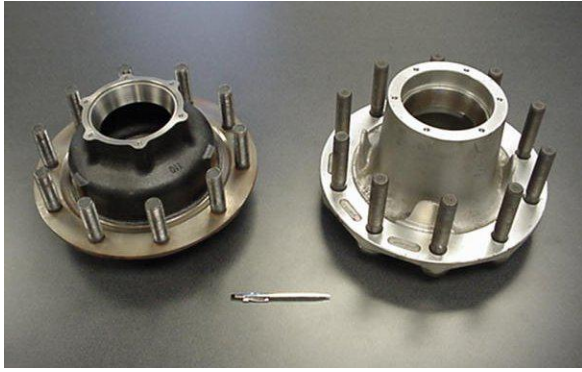


图 11 左边的 ADI 轮毂替代了右侧的金属型铸铝轮毂
降低了 50%内涵能源，重量减轻了 4%



图 12 ADI 控制臂（右）替代冲压钢件（左）
减重 6%，性能测试超预期

我国 ADI 应用中，还是以抗磨、耐磨件为主，特别是磨球，CADI 磨球和奥贝磨球仍占我国 ADI 产量的很大部分。粗略统计，我国 ADI（包括 CADI）年产量约 13 万吨，其中磨球约 7 万吨，占 50%以上；工程结构件（包括齿板、衬板）约占 50%以下。工程结构件中，重型卡车悬挂件、支架占 50%，抗磨、耐磨件占 25~30%，齿轮、曲轴占 5~10%，其它占 10%。

图 13 一款牧场播种器通过钢板切割、冲压、冲孔和焊接而成

突破

00 多

图 14 ADI 牧场播种器为砂型的球墨铸铁毛坯、机加工后热处理制成

70%，即每年要消耗 100 多万吨磨球，几十万吨衬板、齿板，市场是很大的。ADI 不但强度高，韧性好，且具有很好的耐磨性。一些资料报导，HB300 的 ADI 零件其耐磨性能比 HB500 的钢件都好，但所指的耐磨性能一般是有润滑条件下的耐磨性，如曲轴、齿轮等。最近的研究结果还表明，ADI 也具有很好的抗磨性，是高锰钢、合金钢很好的代用材料。迁西奥帝爱机械铸造有限公司四年前就开始用 ADI 齿板和衬板代替高锰钢齿板、衬板工作（见图 15、图 16）。几年使用结果表明，ADI 衬板在 $\phi 4$ 米以下球磨机上应用，其使用寿命比高锰钢高 1~3 倍， $\phi 1200 \times 900$ mm 以下破碎机 ADI 齿板，也比高锰钢寿命高 2 倍以上，目前已大量使用，去年产量在 2000 吨以上。至于 $\phi 6$ 米以上大型球磨机 ADI 衬板，使用效果也不错，但稍逊于贝氏体钢衬板。因此推荐 $\phi 4$ 米以下球磨机采用 ADI 衬板， $\phi 4$ 米以上球磨机衬板采用贝氏体钢。

除衬板、齿板外，像渣浆泵壳体（图 17），水泥输送管、弯头、篦子板（图 18）等零件采用 CADI、ADI 都取得很好效果，已小批量生产。

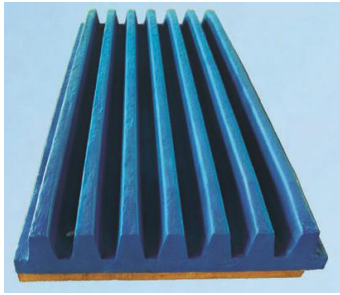


图 15 ADI 齿板



图 16 ADI 衬板



图 17 CADI 渣浆泵



图 18 CADI 篦子板

CADI 磨球从研发至今已有 6~7 年的历史，由河北工业大学和迁西奥帝爱机械铸造有限公司共同开发，已分别于 2011 年 7 月和 2012 年 2 月由河北省科技厅主持在天津和北京召开科研成果技术鉴定会和磨球产品鉴定会，得到较高评价。多年使用结果证明，CADI 磨球与高铬球、低铬球相比，具有磨耗低、破碎率低和节电、噪音低等优点（见表 16）。

表 16 CADI、高铬、低铬磨球性能对比

	CADI 球	高铬球	低铬球
表面硬度/HRC	使用前 56~58, 使用后>62	56~60	45~50
冲击韧度/J/cm ²	>10	≥2.5	≥1.6
磨耗（铁矿）/g/t	250~300	400	600~800
破碎率 /%	<0.2	<0.8	1.0~5.5
节电率 /%	10~20	不节电	不节电

目前迁西奥帝爱公司有 4 条铁模和铁模覆砂磨球线，四条热处理生产线（其中一条为磨球专用连续热处理生产线），可生产 $\phi 40$ 、 $\phi 50$ 、 $\phi 60$ 、 $\phi 80$ 、 $\phi 100$ 、 $\phi 120$ 、 $\phi 130$ 和 $\phi 150$ mm 甚至 $\phi 180$ mm 等 CADI 磨球，具有年产 CADI 磨球 5 万吨的生产能力，是目前我国最大的 CADI 磨球生产厂。河北承德求业钒钛抗磨科技材料有限公司利用钒、钛与 C、N 化合物等硬质点生产的 CADI 磨球，在使用中也取得很好的效果。由于 CADI 磨球使用效果明显，许多磨球厂都争先生产。但由于生产工艺、装备不规范，技术要领未掌握，一些“CADI 磨球”出现质量波动大，使用效果不理想的问题，必须加以重视，如不对他们进行引导、改进、提高质量，业内人士担心会严重损害 CADI 磨球的声誉。

4.2 重型卡车底盘零件应用逐步扩大，产量逐年提高

一汽铸造有限公司、东风汽车公司、河南欧迪艾铸造有限公司、河北清河恒基机械铸造有限公司、大连三明重型车制造有限公司等都是国内目前 ADI 卡车底盘零件生产或使用厂，以往多为板簧支座、支架、拖钩等几种零件，现已发展为几十种零件，产品也大幅上升。如河南欧迪艾公司，目前支座类产品只有 30 万件/年，现要扩大到 100 万件/年，生产能力也从目前的 7000~8000 吨/年扩大到 15000 吨/年。产品种类也增加，如一汽军车左右羊角、越野车左右前控制臂、左右后控制臂，二汽的钢板弹簧导向座、越野车悬挂系统零件八种零件等。目前正在研发、小批试用的产品有 60 吨自卸车前轴（图 19），60 吨载重车后桥总成的前轴（图 20），重型车托架（图 21），转向节（图 22）及重型矿用车后桥等。据统计，一汽、东风汽车重卡每年 ADI 底盘零件约为 5000 吨左右，随着开发力度加大，产量会有较大的增长。



图 20 60 吨载重车后桥总成的前轴



图 21 重型车托架



图 22 转向节

4.3 球铁生产原辅材料质量的改善以及球铁坯件质量的提高，为齿轮、曲轴等零件重新采用 ADI 增强信心。

齿轮是 ADI 最早用于工业化生产的产品，美国、芬兰、中国最早开发的都是 ADI 齿轮。ADI 齿轮具有抗弯曲疲劳强度高、抗点蚀能力强、噪音小、重量比同尺寸钢齿轮减轻 10%、热处理变形小、加工性能好、刀具寿命长和成本低等一系列优点。在我国汽车、拖拉机行业中有较多的开发应用，最早用于轻型、中型载重汽车的后桥伞齿轮的配件上，但批量均不大。批量生产用于正式产品上为大功率柴油发动机上的正时齿轮。东风汽车公司生产的康明斯发动机正时齿轮、一汽集团解放汽车有限公司锡柴分公司生产的 6DF1 柴油机曲轴正时齿轮，齿轮弯曲疲劳强度安全系数可达 3.56 倍。

实践证明，用 ADI 齿轮代替氮化正时齿轮和部分渗碳淬火齿轮在使用中是完全没有问题的，妨碍 ADI 正时齿轮应用的主要原因是价格问题。由于我国钢铁工业发展很快，大容量高炉+纯氧顶吹+连续轧制的钢材生产工艺大幅度地降低钢材的成本，上世纪 90 年代东风汽车公司用 ADI 代替 ANST1022 渗碳钢时， $\Phi 80$ 大截面低合金钢价格为 8000 元/吨，优质生铁价格为 700 元/吨，每套（六个齿轮）ADI 齿轮较钢齿轮制造费降低 17%，约 124 元。目前钢材价格降至 4000 元/吨左右，而优质铸造生铁则升至 3000 多元/吨，因此，如何降低 ADI 齿轮成本便成为扩大 ADI 齿轮应用的关键之一。

ADI 齿轮成本高除了生铁价格高外，铸件废品率高、质量不稳定也是一个重要原因。现在原辅材料质量有保证，球铁生产各环节控制加强，因此球铁件质量稳定，废品率大幅度降低，这为降低球铁坯件成本创造了条件。近来一些单位试图通过提高球铁毛坯件质量降低废品率、控制热处理质量，降低机加工成本（如减小变形，取消昂贵的磨齿工序）等措施来降低 ADI 齿轮的成本。

SEW 公司收购了芬兰的 Kymi Kymmene 厂，在它的产品中，一直坚持采用 ADI 齿轮。自在中国天津建厂后一直积极参加中国 ADI 行业的各项活动，2013 年 ADI 产量 900 吨，预计今年可超过 1000 吨。其产品主要为齿轮和轴，据他们介绍，用 ADI 制造带齿的结构件（图 23）是最合适的，其它材料无法与它竞争。



图 23 带内齿圈的构件

ADI 曲轴的试验开发工作，很多单位都进行并取得较满意的结果，如南京理工大学与淮海机器厂联合试制的 368Q 三缸曲轴，大连柴油机厂、滨州海得曲轴有限责任公司、朝阳柴油机厂联合试验的 4110 和 6110 柴油发动机曲轴，安全系数分别在 1.7、2.0 和 1.8 以上，但都没有正式投产。江苏万力机械股份有限公司多年来也一直进行多缸柴油机 ADI 曲轴试验工作，也取得较好效果。一汽也进行了 1.8T 和 2.0T 奔腾轿车增压发动机 ADI 曲轴的开发，性能试验和疲劳试验均已完成，现正等待台架试验结果。

上述试验情况说明，用 ADI 来制造增压发动机曲轴，是能满足爆发压力提高后对曲轴弯曲疲劳提出的性能要求的。目前的主要问题是经受大批量生产和使用的考验，没有突出 ADI 曲轴的特点，例如高强度高塑性球墨铸铁（QT800-6，QT900-6），同样具有高的弯曲疲劳强度。玉柴、天润等厂生产的曲轴均已用于大马力增压柴油机，ADI 曲轴与其相比究竟有哪些优缺点，只有弄清楚这些情况，才能确定各自的适用范围。

据苏州艾普公司介绍，江苏万力机械股份有限公司近来也在他们公司处理了 2000 多根 ADI 曲轴，供出口，说明国内 ADI 曲轴也在不断发展。

（来源：2015 年兴业铸铁技术论坛论文集）