• 今日铸造 Today Foundry •
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.02.020

轻量化创新是 ADI 发展的方向

刘金城[1],龚文邦[2]
(1. 中国铸造协会,北京 100048;2. 武汉纺织大学 机械工程与自动化学院,湖北 武汉 430200)

摘　要:制造业技术创新是国家经济增长的支撑,是企业获得竞争优势的决定因素。在制造业创新中,轻量化创新是重要的内容。ADI 作为一种高强度轻量化材料,轻量化创新是发展方向。发达国家都很重视轻量化 ADI 铸件的开发。实际上采用 ADI 直接代替铸钢,锻钢件就已经减重 10%。然而,利用 ADI 优越的力学性能,利用铸造较之焊接、锻造和装配在成型方面的优势,利用铸件设计、凝固模拟、应力模拟可以设计和制造出质量更轻、刚度更好、强度更高、功能更强、结构更美、附加值更高的轻量化 ADI 铸件。论述了发达国家以及中国在 ADI 轻量化创新方面的典型实例和经验,并对中国 ADI 轻量化创新如何深入发展提出了一些建议。

关键词:轻量化创新;ADI;发展方向

中图分类号:TG255　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2020)02-0176-09

Lightweight Innovation is the Development Trend of ADI

LIU Jincheng[1], GONG Wenbang[2]
(1. China Foundry Association, Beijing 100048, China; 2. School of Mechanical Engineering and Automation, Wuhan Textile University, Wuhan 430200, China)

Abstract: Manufacture technology innovations are the support of national economic development and the determining factor for competitiveness advantages of enterprises. Lightweight innovation is a very important aspect in manufacture technology innovations. As a high strength and lightweight material, lightweight innovation is the development trend for ADI castings. Developed countries and developing countries attach great importance to the development of lightweight ADI castings, ADI is adopted to directly replace cast steel and forging steel to achieve weight reduction of 10%. However, with the unique properties of the ADI, taking advantage of casting over welding, forging and assembly, by means of casting design, solidification simulation and stress simulation, lightweight ADI castings with lighter weight, better rigidity, higher strength, stronger function, more beautiful structure and higher added value can be designed and manufactured. Some typical examples and experiences of lightweight innovation of ADI castings in developed countries and China, and puts forward some suggestions on how to further develop ADI lightweight innovation in China are discussed.

Key words: lighiweight innovation; ADI; development trend

由于制造业的重要性,近年来发达国家都制定了制造业国家战略规划。《中国制造 2025》规划,在基本方针上将“创新驱动”放在首位,在 9 项战略任务和重点中将“提高国家制造业创新能力”列为第一条,“制造业创新中心建设”也居 5 项重大工程之首,这强调了创新在中国制造业转型和升级中的核心地位。

在制造业创新中,轻量化创新是重要内容。各国政府和企业都非常重视产品轻量化。由美国前总统奥巴马发起,2014 年 2 月建成了《面向未来的轻量化创新中心》(Lightweight Innovations for Tomorrow,缩写 LIFT),这是美国国家轻量化技术开发的领导者。2016 年,《面向未来的轻量化创新中心》启动了多项工业界-学术界合作研究项目以研究优化铸件,其中第一个项目就是轻量化球墨铸铁件汽车变速箱箱体(如图 1)[1]。

项目研究减少制造汽车变速箱箱体所用材料。变速箱类似于格瑞德(Grede)公司和伊顿(Eaton)的核心产品设计。除了格瑞德(Grede)公司和伊顿(Eaton)公司以外,研究团队的其他合作伙伴包括美国铸造协会(American Foundry Society),柯马(Comau)公司,PDA,麻省理工学院(Massachusetts Institute of Technology)和密歇根理工大学。

预期通过采用各种不同的合金成分,融合集成和实施改进的制造方法,就有潜力将球墨铸铁件的壁厚减小达 50%。取决于零件的负载需求,有可能减重 30%~50%。合作伙伴将采用格瑞德(Grede)公

收稿日期:2019-12-20

作者简介:刘金城(1946-),陕西宝鸡人,教授.英国蔓彻斯特大学博士.主要从事金属凝固,凝固过程数学模型,铸造合金,尤其是球铁,蠕墨铸铁和 ADI 研究方面的工作.E-mail:liujincheng64@tsinghua.org.cn

司的新型高精度造型设备，优化化学成分和冷却速度，创造新的薄壁球墨铸铁件，将最前沿的数值模拟和铸件局部性能整合起来，以设计最优化的零件几何形状。这个项目经费为 134 万美元，44%由联邦政府支出，其余 56%由工业界和研究领域的合作伙伴分担。

英国伦敦布鲁内尔大学肯联铝业大学研究中心（The Constellium University Technology Center (UTC) at Brunel University London）已经运行，该中心将为铝合金生产商在设计、样件制造和汽车结构件的开发工作方面提供基础学术研究支持。同时，该大学先进金属铸造中心（Advanced Metal Casting Centre，(AMCC)）也启动了专注开发用于汽车和铁路的轻量化，高性能铝合金项目[2]。相信，其他发达国家也都有类似的轻量化研究开发机构。

世界上虽然还没有国家级别的 ADI 轻量化研究开发机构，但是发达国家的先进铸造厂，热处理厂已经将 ADI 轻量化研究开发作为企业的发展方向之一。例如，美国 Applied Process 成立了 ADI 学院专门开发轻量化 ADI 产品。不少知名的铸造厂都强化了 ADI 轻量化研究开发的能力，并作为提高企业竞争力的主要措施。

1　国内外 ADI 轻量化创新的进展

由于 ADI 含有石墨，比重比钢轻，直接用 ADI 件替代铸钢件、锻钢件就是轻量化创新，可以减重约 10%。采用 ADI 齿轮、曲轴及某些汽车重要结构件，不仅性能提高，质量也减轻。这方面中国已经做了大量工作，产品可以说数不胜数。对于原来的零件根据 ADI 优越的力学性能重新优化设计，重量减轻可达 20%～35%。在这方面国内外都做了大量工作，开发了大量新的 ADI 零件[3-16]。以下介绍几个典型实例。

1.1　榨螺

榨螺是榨油机上的易损件，主要损坏是磨损和螺纹断裂。湖北安陆某粮油机械厂生产的 202 型榨油机 ADI 榨螺[3]，如图 2 所示。原为 45 钢锻坯，经正火、粗加工、调质处理、精加工，最后进行表面高频淬火。零件净重 18.5 kg，锻坯毛重 62 kg，材料利用率 29.8%。

ADI 榨螺件经重新优化设计，铸造工艺用漏模造型机，湿型砂造型，铸件只进行两端面及内孔的机加工，加工量减少。生产工序为铸造→粗加工（两端面及内孔）→等温淬火热处理→精加工（两端面及内孔）→检验入库。ADI 零件重 15 kg，较锻钢加工件减重 19%。ADI 件浇铸重 20.5 kg，较钢坯轻，节省67%。

湖北当阳市棉花公司育溪加工厂 202 型榨油机应用 ADI 榨螺，生产棉籽 2 000 t，比原钢制榨螺使用寿命提高 4 倍，拆下来检查，仅很少磨损，尚可继续使用。江西横峰油脂厂使用 ADI 榨螺后，惊奇地发现 ADI 榨螺的磨损非常小，生产 4 000 t 原料后，仍在使用。ADI 榨螺使用寿命比锻钢件提

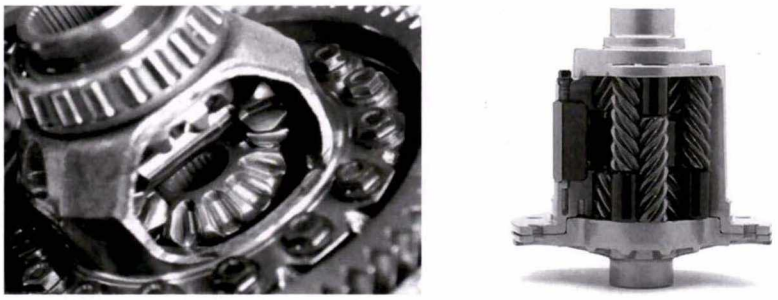
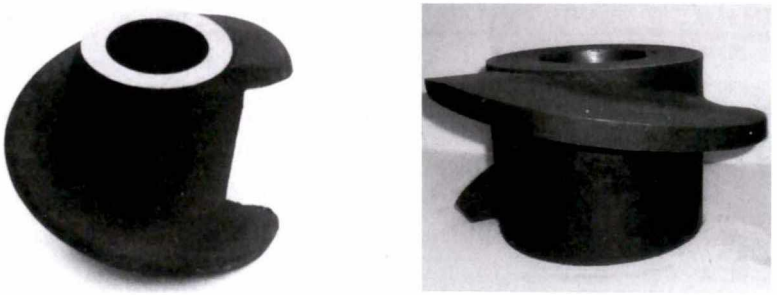


图 1　汽车变速箱箱体
Fig.1　Automobile gearbox body



(a)ADI榨螺　　(b)钢制榨螺

图 2　ADI 榨螺（左）和钢制榨螺（右）
Fig.2　ADI screw (left) and steel screw (right)

高 4～10倍。

1.2 风镐缸体

ADI 900-9 风镐缸体[4]平均壁厚 20 mm，重 18 kg，如图 3 所示。原产品锻钢件重 27 kg 减重 9 kg，减重 33.3%。质量轻，方便工人操作，降低噪音，改善工作环境。风镐产品力学性能见表 1。

图 3 ADI 900-9 风镐缸体
Fig.3 ADI 900-9 air pick cylinder

表1 风镐产品力学性能
Tab.1 Mechanical properties of air pick parts

项目	Ⅱ型试样	本体试样
抗拉强度 R_m/MPa	≥1000	≥900
伸长率 A(%)	≥11	≥9
硬度(HB)	≥270	≥270
冲击功(无缺口)/J	≥140	≥120

1.3 非道路用车悬架零件

东风汽车公司和 AP 苏州合作将 25 种非道路用车悬架零件改造成 ADI 铸件[5]，如图 4 所示。原来的钢制零件总重 415 kg，改成 ADI 后，较之原来的钢制零件减轻 150 kg，减重 36%。

1.4 复轨器

运行在轨道上的车辆，由于超速、碰撞、线路故障等各种原因，经常会发生脱轨掉道现象，给生产、安全带来很大的影响。复轨器就是能使脱轨的机车，车辆的车轮复位到钢轨上的专用工具。由美国 Pennsy Corp.公司和 Applied Process 于 2011 年联合开发的 ADI 复轨器代替了原来的钢制复轨器，设计轻巧，质量更轻，如图 5 所示。由表 2 可知，除了弹性模量低于钢以外，ADI 的其它性能均优于钢制复轨器[7]。

表 2 钢制和 ADI 复轨器比较
Tab.2 Comparison of steel and ADI retractor

性能	ASTM 牌号 E 钢	ASTM 牌号 3 ADI
弹性模量 /GPa	203.4	140.6
屈服强度 / MPa	689.5	1 103
屈服时应变	0.003 9	0.006 7
抗拉强度 MPa	827.4	1 310
断裂时应变(%)	20	7
切线模量 /MPa	672.7	3 152.3
重量 /kg	61.24	44.45

在 ADI 轻量化创新中，将若干分离的钢材焊接而成的焊接件，或者锻件、铸件经机加工，机械连接或焊接而成的组装件改成 ADI 后，在轻量化及提高性能、降低成本等方面具有更多的优点。这方面国外作了大量工作值得我们借鉴。

2 轻量化的重要方面——组装件和焊接件改成 ADI 件

在欧美发达国家，组装件及焊接件轻量化创新通常有 3 种方式。

(1)美国和欧州许多设备制造商为了提高竞争力一直在研究如何使设备轻量化，研究如何降低成本，如何提高设备性能，如何满足新的排放要求，这就常常需要改进设计，改进零部件或铸件的设计。许多复杂的焊接件和组装件在与铸造厂的合作中被改成 ADI 铸件。

例如位于美国明尼苏达州布鲁明顿的多罗公司（The Toro Co., Bloomington, Minnesota，USA）与位于美国明尼苏达州布鲁明顿市(州政府所在地)明尼阿波利斯郊区的史密斯铸造厂（Smith Foundry Co.)合作开发生产了驱动轮，如图 6 所示。原设计为 84 件钢零件装配而成，新设计为一个整体，湿型砂铸造，减重 15%，成本降低 55%。用户每年节约成本 19 万美元。较之原组装件省去了 30 min 的装配时间，耐磨性提高，使用寿命更长，外型也更美观。该铸件 2003 年获得美国铸造协会优秀铸件奖[13]。

位于德克萨斯州的 Citation 铸造厂为戴姆勒-克莱斯勒 2500/3500 道奇公羊皮卡生产的的悬架系统的下控制臂，见图 7 [14]。该件原来由 4 件钢件(3 件模锻，1 件铸件)经焊接，机加工，组装而成，现设计为一件 ADI 铸件。用有限元分析优化设计，并经过实验验证。重新设计的铸件，减重 2.27 kg(每辆车 2 件)，并取消了原有的轴套。另外，节省 150万美元的机加工费用。该铸件获得 2002 年美国铸造学会优秀铸件奖。

位于明尼苏达明尼阿波利斯市(Minneapolis, Minnesota)特鲁瓦克斯公司(Truax Company INC.)生产的草地播种机要在有岩石和崎岖不平的地上播种。他们发现钢板激光切割再焊接而成的播种器有播种不均匀的问题。于是联合同样位于明尼苏达明尼阿波利斯市(Minneapolis, Minnesota)的史密斯铸造厂(Smith Foundry Co.)将多个钢板激光切割件焊接而成的部件经过优化设计改成一件草地播种器 ADI 铸件，如图 8 所示。与焊接件相比，减重 15%，客户供货时间减少 50%，节省 65%成本。使用性能和耐磨性优于焊接件。该铸件获得美国铸造协会 2007 年度铸件奖[15]。

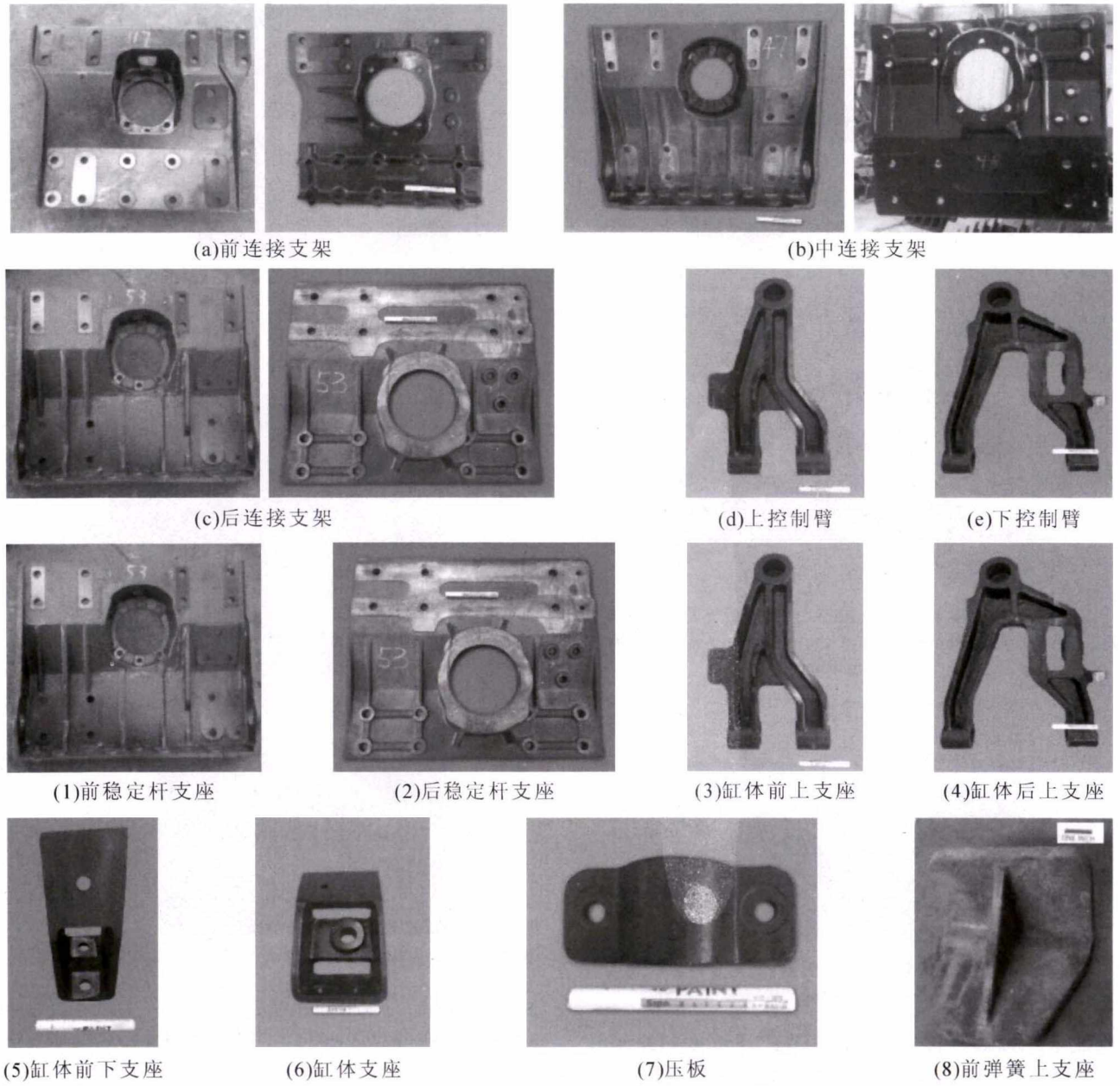


图 4 非道路用车悬架 ADI 铸件

Fig.4 Non-road vehicle suspension ADI casting

(a)钢制复轨器　　(b)ADI复轨器

图 5 钢制复轨器(左)和 ADI 复轨器(右)

Fig.5 Steel retracer (left) and ADI retracer (right)

(2)铸造厂利用客户访问自己工厂的时候主动与客户交流自己的新材料或新工艺，例如新的制芯工艺和造型设备可以生产形状更复杂，尺寸更精确的铸件，新的合金材料，例如 ADI 可以有更好的力学性能。笔者所在公司就这样为客户开发多件新的 ADI 铸件替代了钢组装件。该铸造厂的销售人员和技术人员在访问客户时都注意观察客户的设备零部件，建议可以开发新铸件代替焊接件和组装件，或降

图 6 建筑和园林用装载机 ADI 驱动轮
Fig.6 Construction machinery and garden loader ADI drive wheel

图 7 道奇公羊皮卡(Dodge Ram)的悬架系统的下控制臂
Fig.7 The lower control arm of the suspension system of the Dodge Ram

图 8 获得 2007 年度美国铸造协会铸件奖的草籽播种器铸件
Fig.8 The seed seeder casting awarded the 2007

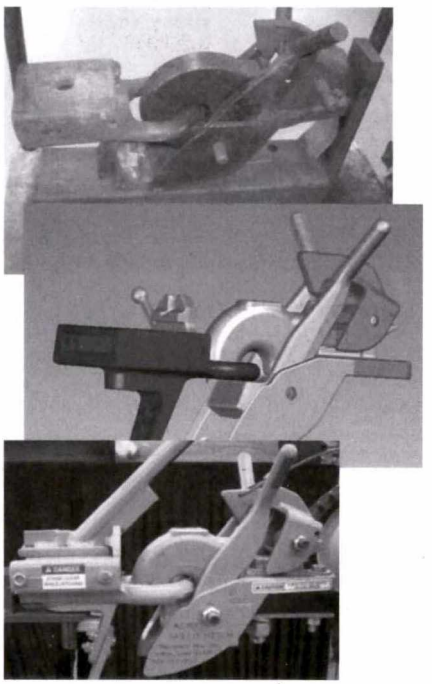


图 9 格曼的农用设备快速挂钩(上–焊接件,中–计算机模拟,下–ADI 铸件)
Fig.9 Bergman agricultural equipment quick hooks (up-weld assembly, medium-computer simulations, down-ADI castings)

低成本或提高性能。另外,铸造厂还可专门组织技术交流会,向客户的技术人员,采购人员和售后服务人员介绍,特别说明铸件有将复杂的焊接件和组装件改成铸件的能力和优势。

(3)某些偶然事件可能会引起设备制造商将钢材焊接组装件改变成 ADI 铸件。例如,位于美国艾奥瓦州亚瑟市博格曼制造商 (Bergman Mfg, Arthur, IA)是一家专门生产拖拉机与农用设备挂钩的小公司,博格曼家族也经营农场。一年公司遭遇一场冬季火灾,大火烧毁了全部生产设备和工具,无法供应即将到来的春季销售需要。他们与位于明尼苏达州曼凯托市(Mankato, Minnesota)的多特森铸铁厂(Dotson Iron Castings, Mankato, Minnesota)合作,将 25 年前设计的由 17 个零件焊接成的零件改成 ADI 铸件,如图 9 所示。ADI 铸件很快投入批量生产,赶上并完成了春季销售季节需要。该厂总经理麦克博格曼(Mike Bergman)说:“铸造的 ADI 快速挂钩拯救了我们的企业。”。

这两个由湿型砂生产的重约 32 kg 的 ADI 铸件减重 30%,降低成本 40%,改善了外观,制造商的名称也可以铸在铸件上。农用设备快速挂钩能够自动挂上和松开农用设备,不需要驾驶员离开驾驶室,可牵引的重量远超过美国运输部的要求。该产品销往美国、加拿大和日本。该铸件获得美国铸造协会 2008 年优秀铸件奖[16]。

一般来讲,组装件和焊接件经过优化设计改成 ADI 后具有以下优点:①消除焊接影响区以及焊接应力造成的零件变形,公差超限等缺陷;②改善加工性能,减少机加工时间和费用;③减少装配时间和费用;④优化设计使零部件负载分布更均匀;⑤减重实现轻量化,减轻重量;⑥提高减震性和改进外观;⑦提高零部件的功能;⑧提高附加值;⑨降低成本;⑩较之焊接和组装件,铸件更容易批量化生产,提高产

能；⑪ 提高客户和铸造厂的竞争力。

在组装件和焊接件进行 ADI 轻量化改进工作中，团队协作十分重要。将组装件和焊接件改成 ADI 不是一个人，一个部门的工作。需要多个团队，多方面的人员和几个部门带着各自的经验，紧密合作。开发上述轻量化 ADI 的原始设备制造商和铸造厂以及相关工装模具铸造和机加工单位都表明，轻量化 ADI 零件的成功投产往往是团队紧密合作的成果。

3　组装件和焊接件改成 ADI 的方法步骤

要将组装件和焊接件改成 ADI 件，首先要选定要改进的零部件。以下以 MTU 公司（发动机及涡轮机联盟弗里德希哈芬股份有限公司）开发 MTU BR 系列 8000 船用柴油机发动机支座为例说明组装件改进设计为 ADI 件的方法[17,18]。

MTU 公司（发动机及涡轮机联盟弗里德希哈芬股份有限公司）很长时间以来就想减轻 BR 系列 8000 高性能船用柴油发动机支座的质量。MTU V 型 20 缸 8000 型发动机如图 10 所示。该发动机动力达到 9 000 kW，每侧有 4 个发动机支座。所示的一个支座有一个支撑固定臂用于安装传输增压器和内部冷却器支杆。材料为 DIN EN 10025。他们与德国铸造公司（Hulvershorn Foundry）和英国 ADI 热处理公司（ADI treatments）共同合作将钢制焊接组装支座改成 ADI 铸件。

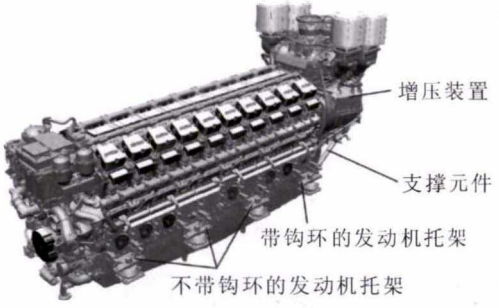


图 10　20 缸 V 型共轨技术高性能柴油发动机（MTU V 型 20 缸 8000 型）

Fig.10　20 cylinder V common rail technology high performance diesel engine (type of MTU V 20 cylinder 8000)

3.1　采用 CAX 工具对现有的焊接件组装建立三维数值模型

数字化三维模型成为整个产品生命周期中不可缺少的驱动因素。现代的 CAX 工具具有强大的实体造型能力，可以很快根据点、线、面进行立体造型，利用积木方式建立起三维模型。另外，功能强大的逆向工程系统软件，也可以从已存在的零件中产生三维 CAD 模型。图 11 为原钢制焊接组装件支座数值模型。钢制焊接组件发动机支座由以下零件组成，6 个焊接件：一个带 5 个通孔的底板，两个带两个通孔的左右侧板，撑板（加强筋），右侧螺栓连接的固定臂板和固定臂，4 个螺栓。

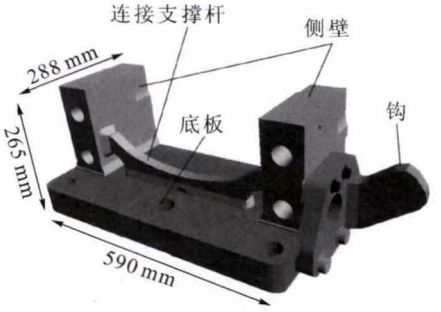


图 11　钢制焊接组件支座模型

Fig.11　Steel welded assembly support model

3.2　铸件结构优化设计

采用先进的 CAX 工具对零件进行优化设计。经过优化设计的带左侧固定杆的 ADI 发动机支座铸件如图 12 所示。对比原来机加工钢制支座，加强筋形状改变，侧板和底板壁厚减薄，增设加强筋保持刚度。优化壁厚和减轻重量，有利于提高整机功能，改善铸造及热处理工艺性。

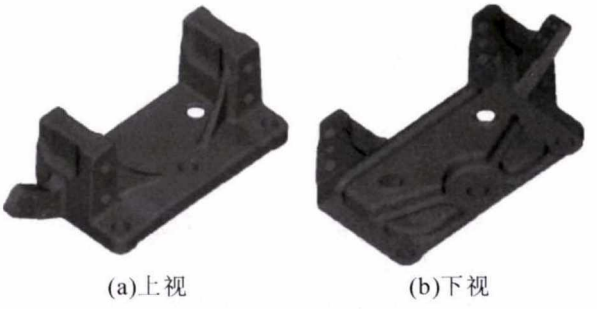


图 12　优化设计的带左侧固定杆的 ADI 发动机支座铸件

Fig.12　Optimally designed ADI engine support casting with left side fixed lever (left side up, right side down)

3.3　对零件进行静态及动态应力分析

零件工作应力模拟分析如图 13 所示，模拟结果显示，最大应力出现在侧板的螺栓面和支座连接处和加强筋处。crank case 为曲轴箱，engine bearing 为发动机底座。由于优化设计，应力和应变都是安全的。

3.4　选定材料牌号，优化热处理工艺

根据零件受力分析，为该零件选定的材料牌号为 GJS ADI 800-500-8 (BS EN 1564:1997)。依据材料牌号，设计铸件化学成分，再根据成分及壁厚优化热处理工艺。最佳热处理工艺选择如图 14 所示。

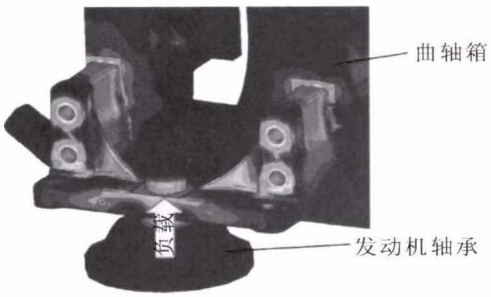


图 13 支座连接处的垂直负载和由于装配产生的预应力分布
Fig.13 Vertical load at bearing joint and prestress distribution due to assembly

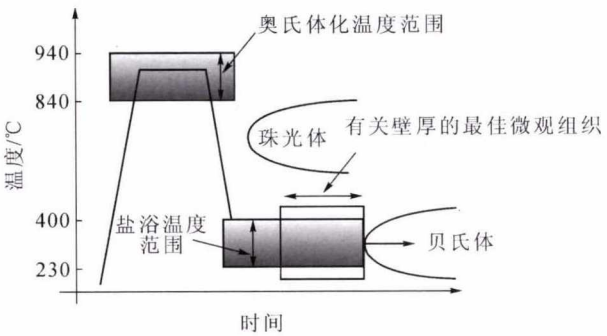


图 14 选择最佳的热处理工艺
Fig.14 Select the best heat treatment process

3.5 采用凝固仿真优化铸造工艺并进一步改进铸件结构

对初步设计的铸件采用凝固模拟仿真技术进行浇冒口等铸造工艺优化设计，以获得优化铸造工艺方案。新的仿真技术结合自主优化(autonomous optimization)可以快速、全面和非常精准地综合设计浇冒口及各铸造工艺参数，预测组织性能，并对铸件结构设计提出改进方案[19-21]。

以上 5 个步骤可能需要迭代反馈以获得最佳的铸件结构及工艺设计。

3.6 根据优化的铸件设计，制造工装模具

图 15 为根据优化的铸件设计制造的型板。

3.7 ADI 零件制造

根据优化的铸造及热处理工艺，浇注铸件，并实施等温热处理，对生产过程中的微观组织进行检测控制，获得组织及性能符合要求的 ADI 零件。经加工后的 MTU V 型 20 缸 8000 型发动机 ADI 支座零件及微观组织如图 16 所示。

图 15 根据优化的铸件设计，制造的型板
Fig.15 According to the optimized casting design, manufactured the mold plate

3.8 对零件进行性能检测

在 MTU 实验室对优化设计生产的 MTU 发动机 ADI 支座进行性能检测和疲劳测试(在实验载荷超过动力 1.7 倍的条件下)，以及发动机台架实验和振动测试，实验装置如图 17 所示。

经检测，关键部位本体的抗拉强度 900 MPa，屈服强度 645 MPa，伸长率≥8%，疲劳测试(载荷超过动力 1.7 倍的条件下，10^6 次)未出现裂纹。发动机台架实验和振动测试，结果满足要求。

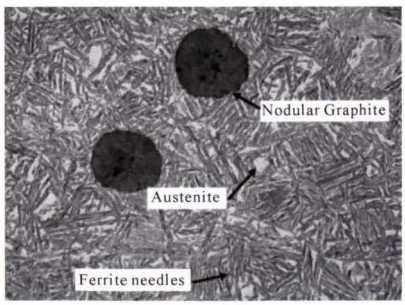
3.9 安装应用

测试合格后 MTU BR 8000 系列高性能船用柴油发动机和支座在渡船和游艇等船舶上开始使用。如图 18 所示。

新设计的 ADI 支座已经在船舶上应用。支座重从原来的 126 kg 减少至 85 kg，降低 30%。整个发动机减重 300 kg。不仅减少了每个零件的生产时间，也节省了装配时间，降低了成本。

这个实例中再次显示，开发轻量化 ADI 零件需要紧密的团队协作。MTU 是世界著名的大功率高性能柴油发动机生产商，德国 Hulvershorn Foundry 是

(a)支撑臂铸件



(b)微观组织

图 16 优化设计生产的 ADI 左侧带固定支撑臂的 MTU 发动机支座和微观组织(基体为奥铁体)
Fig.16 Optimized design and production of ADI MTU engine support and microstructure with fixed support arm on the left side (the matrix is austenite)

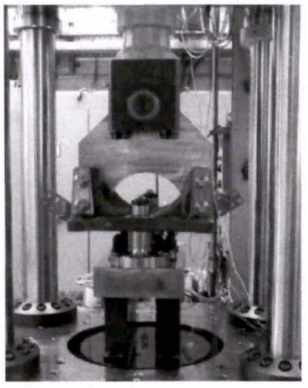


图 17 MTU 实验室的发动机 ADI 支座性能检测和发动机台架实验

Fig.17 Engine ADI support performance test and engine bench test in MTU laboratory

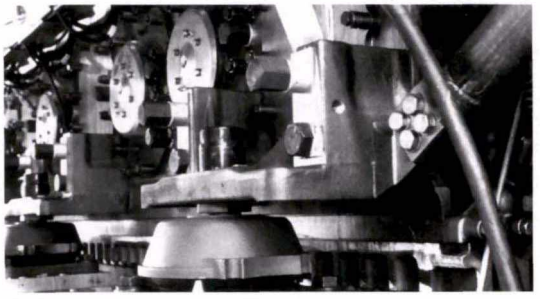


图 18 应用在船舶上的 MTU BR 8000 系列高性能船用柴油发动机和支座

Fig.18 MTU BR 8000 series high performance Marine diesel engines and supports for ships

德国先进的中小批量铸件生产厂，具有丰富的开发 ADI 的经验。英国 ADI Treatment 是世界先进的专业化热处理公司，拥有多台先进的 AFC 自动化 ADI 专业热处理炉和丰富的开发 ADI 零件的经验。这 3 家公司各个相关部门的密切合作使得 ADI 支座成功投产。开发实例也显示，开发轻量化 ADI 零件还需要先进的 CAX 工具，先进的凝固模拟工具，先进的铸造设备，先进的热处理设备和先进的检测设备。

中国不少企业已经拥有世界先进的 CAX 工具和先进的凝固仿真工具，中国已经能够生产高质量球墨铸铁，中国已经有了世界先进的 ADI 专业热处理设备制造厂家和 ADI 专业热处理厂家。相信，只要充分发挥科技人员的创新精神，加强团队合作，我国一定能开发出大量的轻量化 ADI 零件。

4 结论和几点建议

(1)轻量化是铸件的发展方向。对于原来的零件根据 ADI 优越的力学性能重新优化设计，替代组装件和焊接件，实现轻量化创新是 ADI 发展的方向。

(2)建议铸造企业除了投资新技术和新设备外，还需对员工进行必要的培训投资，给员工创造职业发展机会，鼓励员工进行轻量化创新。

(3)建议成立 ADI 轻量化创新委员会。ADI 轻量化创新委员会负责向国家有关单位申请轻量化创新基金，协助铸造厂和用户开发和批量生产轻量化 ADI 零件。

(4)建议铸造学会，铸造协会等行业组织举办 ADI 轻量化创新研讨班，推动 ADI 的轻量化创新。

参考文献：

[1] 刘金城. 美国“面向未来轻量化创新中心”实施多项轻量化创新研究项目[J]. 铸造, 2016, 66(5):484.

[2] 刘金城. 英国启动轻量化铝合金研究中心 [J]. 铸造，2016，6, 596，新建的特钢厂将推动英国铸钢业的创新能力 [J]. 铸造. 2016, 65(6):596.

[3] 向纲玉. ADI 的研究与应用 //ADI 国际学术研讨会论文集[C]. 湖北武汉，2000, 10: 65-72.

[4] http://qixin123456.com.pe168.com/introduce/

[5] Li Tao, Heng Liqiong, You Jiansong, Huang Jiancheng, Pang Di, Feng Meibiao, Andy Chen, Xia Yong, Application of ADI for Suspension Components in Off-Road Vehicles, World Conference on Austempered Ductile Iron [C]. October 27-28, 2016, Atlanta, GA, USA.

[6] 刘建伟，李迎浩，刘水生. 等温淬火球墨铸铁在悬架系统零部件轻量化设计中的应用 // 第 5 届全国等温淬火球铁(ADI)技术研讨会[C]. 吉林长春，2011.8.6-9，52-57.

[7] Zac Brook and Angella Sell, ADI Rerailer -A Story of Lightweighting in the Railroad Industry, World Conference on Austempered Ductile Iron (C), October 27-28, 2016, Atlanta, GA, USA.

[8] Erik Hepp, Marat Dzusov, Wilfried Schäfer, Christof Heisser, Autonomous Optimization of an ADI Castings, World Conference on Austempered Ductile Iron [C]. October 27-28, 2016, Atlanta, GA, USA.

[9] E. Nelson, Why ADI? Four applications where ADI is the material of choice and process considerations, World Conference on Austempered Ductile Iron [C]. October 27-28, 2016, Atlanta, GA, USA.

[10] F. Zanardi and E Veneri-ADI for Lightweight Suspension Components in Light Commercial Vehicles,□World Conference on Austempered Ductile Iron [C]. October 27-28, 2016, Atlanta, GA, USA.

[11] Keough, Solomond, Lefevre-Thin-Wall Ferrous Castings Produced from Inorganically Bonded Sand Molds Printed at Line Speed, World Conference on Austempered Ductile Iron [C], October 27-28, 2016, Atlanta, GA, USA.

[12] Rimmer and Morrell - Application of ADI in a Crushed Coal Delivery and Filtering System, World Conference on Austempered Ductile Iron [C], October 27-28, 2016, Atlanta, GA, USA.

[13] 2003 Casting Contest Modern Casting, June 2003, 26-31.

[14] 2002 Casting Contest Modern Casting, July 2002, 22-27.

(下转第 191 页)

晶核的损耗。

5.2.3 包内增碳法

若必须在包内增碳，可将粒度为100~300目的增碳剂置于包底，用高温铁液直接冲到增碳剂上（或随铁液随流加入），出铁后充分搅拌，使碳溶解吸收。包内增碳效果不如炉内增碳，吸收率难以控制。

不论使用那一种增碳剂或增碳方法，都应通过生产试验确定增碳工艺和吸收率，工艺一经确定，不要轻易更换增碳剂种类及产地，若要更改就必须再次通过生产验证。

6 灰铸铁件氮气孔的防止

生产合成铸铁铁液中的含氮量可达0.008%~0.012%，甚至更高。因球化处理有强烈的除气作用，所以球墨铸铁含氮量很低；灰铸铁中含有一定量的氮，可使石墨卷曲和促进珠光体细化的作用，有助于改善力学性能。高牌号灰铸铁可将溶氮量提高至120×10^{-6}（厚壁铸件不得超过80×10^{-6}）。但含氮量在0.01%（100×10^{-6}）以上铸件就容易产生裂隙型氮气孔。

氮首先来自废钢。废钢的含氮量比生铁高，电弧炉废钢又高于转炉废钢。

氮亦来自增碳剂。不同增碳剂的溶氮量差别很大。石墨型增碳剂含氮量少，而煤类和煅烧石油焦增碳剂要高很多，因此在选用煤类和石油焦增碳剂时，必须注意氮的含量。

铁液增碳后氮含量会显著增加，但只要在平衡温度下保持一段时间，即可降至正常水平，因此增碳后不宜立即出炉。

7 结语

（1）中国已进入合成铸铁时代，生产高质量的合成铸铁一定要有合格的废钢和高质量的增碳剂。

（2）中国废钢积存量虽日渐充裕，但在管理、分类等方面尚未跟上存量增加的步伐；另外铸造用废钢尚无标准，应引起有关方面的重视。

（3）增碳剂已出现供大于求的苗头，应引导增碳剂生产企业在提高质量、扩大品种、真诚服务、争创品牌上下功夫，除满足国内市场外还可走出国门占领国际市场，千万不要搞不顾质量的恶性竞争。

（4）希望铸造专家、铸造企业和铸造材料公司通力合作，加大对“合成铸铁”的研究，提高我国“合成铸铁”的水平。

参考文献：

[1] 金永锡. 推广合成铸铁应用的若干问题 [J]. 现代铸铁，2009(5): 11-16.

[2] 刘彪. 中国钢铁工业运行情况及展望[R]. 北京：中国钢铁工业协会，2019.

[3] 巩济民，徐仁瑞，万仁芳. 主编《铸造原辅材料手册——砂型铸铁分册》[M]. 北京：国家开发大学出版社，2018.

[4] 王顺安，邹容剑. 合成铸铁熔炼工艺及增碳剂吸收率影响因素[J]. 现代铸铁，2015(5):52-54.

[5] 黎克仕. 感应电炉熔炼铸铁[M]. 北京：机械工业出版社，2016.

[6] 张福勤，黄启忠. C/C复合材料石墨化度与导电关系[J]. 新型碳材料，2001(2):45-48.

(上接第183页)

[15] 2007 casting competition, Modern Casting June 2007, 24-29.

[16] 2008 casting competition Modern Casting, May 22-27.

[17] Cahit Demirel, Thomas Behr, Kar-L Weisskopf, Reiner Bochen Christian Gudisch, The application of high-strength cast irons (ADI -austempered ductile iron) in high-performance diesel engines- part 1, FTJ October 2006, 248-250.

[18] Cahit Demirel, Thomas Behr, Kar-L Weisskopf, Reiner Bochen Christian Gudisch, The application of high-strength cast irons (ADI -austempered ductile iron) in high-performance diesel engines-part 2, FTJ November 2006, 286-288.

[19] David Schmidt, Using Simulation to Drive Rigging Design, www.foundrymag Feb 13, 2017, https://finite.solutions.

[20] Smiley and Schmidt, Computer design of feeding systems for iron castings for how to avoid years of problems with 20 minutes of analysis. AFS proceedings of 2013.

[21] The Next Level of Casting, Coremaking Process Simulation, http://www.foundrymag.com Jan 17, 2017and www.magmasoft.com

杭州文特机电有限公司

热处理炉、加热炉、工业自动化工程、环保节能工程、机电设备的设计、制造、加工、安装、技术开发、技术咨询、技术服务。工业自动化设备、仪器仪表、工业炉窑配件、计算机等的生产、批发、零售。

地址：杭州市西湖区万塘路262号6号楼5-65室
厂址：长兴县林城镇午山岗开发区
联系人：丁为兵
电话：15088362822
传真：0572-6087688
邮箱：dwb150@163.com