

国外 ADI、AGI 和 ACGI 研发的一些新动向

刘金城¹, 龚文邦²

(1. 中国铸造协会等温淬火分会, 北京 100044; 2. 武汉纺织大学机械工程与自动化学院, 湖北武汉 430200)

摘要: 论述了国外等温淬火球墨铸铁 (ADI) 产品研发的一些新动向, 包括直接替代、产品优化和整合集成组装件的实例。介绍了一些ADI生产厂家, 包括欧盟为打开ADI应用市场所采用的一些有效和最新的做法。文中还介绍了国外等温淬火灰铸铁 (AGI) 和等温淬火蠕墨铸铁 (ACGI) 研发的最新动向和一些应用前景。

关键词: 等温淬火球墨铸铁 (ADI); 等温淬火灰铸铁; 等温淬火蠕墨铸铁; 研发动向

等温淬火球墨铸铁 (ADI) 从20世纪70年代成功研制出以来, 开发和扩大ADI的应用一直是ADI研发单位和生产企业不懈努力的方向。所有ADI生产厂家包括铸造厂、专业热处理厂家都在想办法开发ADI新产品 (包括直接替代球铁件、铸钢件、锻钢件等产品)、优化ADI铸件和整合集成ADI零件。为了开发最终用户, 所有ADI生产厂家都根据各自条件和优势采取了各种不同的措施让最终用户相信采用ADI会给他们带来经济效益, 并取得了可喜的成果。本文叙述了一些ADI生产厂家 (包括欧盟) 为打开ADI应用市场所采取的一些有效和最新的做法。文中最后介绍了国外等温淬火灰铸铁 (AGI) 和等温淬火蠕墨铸铁 (ACGI) 最新的研发趋势、它们的优势和一些已有的和潜在的应用前景。国外在ADI推广上的一些有效做法值得我国ADI生产企业及有意向开发ADI产品的企业借鉴。

1 ADI产品开发

(1) ADI直接替代球铁件、铸钢件或锻钢件。开发ADI应用最直接的办法就是直接替代球铁件、铸钢件或锻钢件原件, 如曲轴、齿轮及一些结构件等。通常是原设计的球铁件、铸钢件或锻钢件; 或者是由于强度不够造成使用中断裂失效而需要更换材料的结构件; 或者是设计需要加厚加大, 而周围空间不允许, 需要在不改变设计的情况下更换强度更高的材料。ADI密度比钢大约轻9%, 有利于节能和减少CO₂排放。图1为代替锻钢和球铁800的ADI1050曲轴^[1], 用在跑车Tuscan Speed Six上, 重29.9 kg。

(2) ADI件优化设计。虽然直接替代可以解决使用问题, 但利用ADI的高强度高韧性和铸造技术设计灵活的特点, 根据工作应力重新设计零件, 可进一步减轻铸

作者简介:

刘金城 (1946-), 男, 博士, 研究方向为凝固数值模拟、铸件合金、铸造技术管理。

E-mail: liujincheng64@tsinhua.org.cn

通讯作者:

龚文邦, 男, 教授。电话: 13657273652, E-mail:

gongwenbang@qq.com

中图分类号: TG143

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977 (2021) 10-1149-06

收稿日期:

2020-12-01 收到初稿,

2021-04-16 收到修订稿。

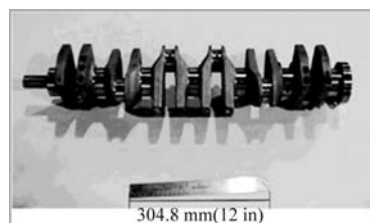


图1 跑车Tuscan Speed Six用ADI曲轴
Fig. 1 ADI crankshaft for Tuscan Speed Six

件重量,节能和减少CO₂排放。图2为在满足原设计负载要求的同时,轻量化设计的ADI汽车转向节,重量减轻19%^[2]。

运行在轨道上的车辆,由于超速、碰撞、线路质量等各种原因,偶尔会发生脱轨掉道现象,带来安全隐患。复轨器就是能使脱轨机车的车轮复位到钢轨上的专用工具。美国Pennsy公司和Applied Process公司于2011年联合开发了ADI G3复轨器替代原来的ASTME钢制复轨器,设计精巧,重量更轻,工人使用操作更方便,重量从61.24 kg减为44.45 kg,减轻27%,如图3所示^[3]。据了解,我国也有单位开发了ADI复轨器。

(3)整合多个零件组成的装配件集成为一个ADI件。利用ADI的高强度、高韧性、耐磨性好和铸造技术设计灵活的特点,可以进一步发挥ADI的优越性。建筑及园林装载机的驱动轮,原设计为84件钢制零件加工和焊接装配而成;新设计为ADI整体一件,湿型砂造型,重量减轻15%,成本降低约55%。用户每年节约成本19万美元。较之原组零件省去了30 min的装配时间,而且耐磨性提高,更耐用,外型也更美观。该铸件2003年获美国铸造协会优秀铸件奖,如图4所示^[4]。

图5^[5]是42个部件组装而成的泰德铰链被改造成一件整体式ADI件,取代了两个铰链所需的所有部件,减少库存95%,减少装配时间82%,降低成本64%。

2 国外开发ADI产品的做法

要开发ADI件,首先要获得开发的任务,或者说拿到订单。以下是国外的一些做法。

(1)英国ADI Treatments公司的做法。ADI Treatments 是一家专业热处理厂,其开发ADI的做法是:访问潜在用户,介绍ADI性能和应用,以及最新应用信息,获得潜在改造为ADI的铸件,拿到订单,由原铸造厂或选择新铸造厂生产球铁毛坯,由ADI Treatments公司进行热处理,并对产品负责;访问球墨

铸铁生产厂家,介绍ADI性能和应用,以及最新应用信息,获得潜在改造为ADI的铸件,拿到订单,进行ADI热处理,交付用户,并对产品负责;参加各种展会,不断更新网页,介绍ADI的性能与应用以及企业的生产能力和所开发的零件。

(2)铸造厂的做法。逐一访问潜在用户,对象是设计和采购部门,介绍ADI性能和应用,提供ADI资料,获取订单,交给专业热处理厂进行ADI处理,并对产品负责。或在客户来访时介绍ADI性能和应用。参加各种展会。不断更新网页,介绍ADI的性能和应用,以



图2 汽车转向节在满足原设计(左)负载要求的同时进行轻量化设计(右)重量减轻19%

Fig. 2 Steering knuckle in the original design (left) and in the weight optimized design (right), a weight savings of 19% could be achieved while still fulfilling the load requirements

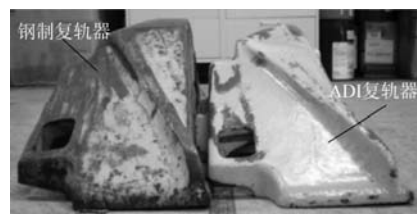


图3 钢制复轨器和轻量化设计的ADI复轨器
Fig. 3 Steel rerailer and lightweight designed ADI rerailer

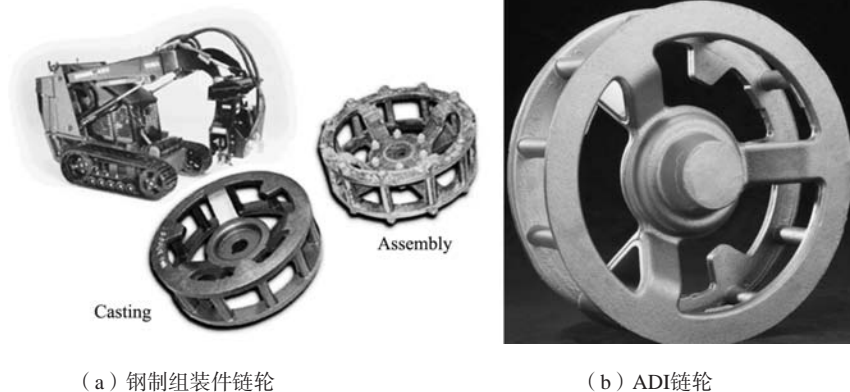


图4 建筑及园林装载机的钢制组配件链轮和ADI链轮
Fig. 4 Drive wheel for a construction and landscape utility loader: steel assembly wheel (a) and ADI wheel (b)



图5 原设计的两件式42个部件组装而成的泰德铰链 (a, b) 改为整体式一件ADI件 (c, d)
Fig. 5 Original two-piece, 42-component assembled Tedder hinge (a, b) converted into a one-piece ADI casting (c, d)

及企业的能力和所开发的零件。

(3) 美国Applied Process公司的做法。访问可能的用户以及球墨铸铁生产厂家, 介绍ADI的性能和应用。建立了一个“快乐工坊 (Joyworks)”, 不以盈利为目的, 进行样件试制和培训。以快乐工坊为基地举办ADI学习班, 对象为铸造厂技术人员, 培训内容包括学习和试验。学习内容: ADI的性能牌号、组织及应用。自己动手实验, 包括从设计、铸造、热处理、检测、金相组织分析等, 生产出一种牌号的ADI铸件, 学期数日。举办针对铸造厂销售人员的ADI学习班, 对象为铸造厂的销售工程师, 学期数日。开办AP University, 对象为铸造厂技术人员、销售人员、用户工厂设计人员等。内容包括ADI性能牌号、金相组织、铸件改造、优化设计等。自己动手实验, 检测分析等, 学期数日。参加各种展会, 不断更新网页, 介绍ADI的性能和应用, 企业的生产能力和所开发的零件。

(4) 欧盟的做法。成立了ADI推广委员会 (ADI promotion), 出版了推广资料“ADI: Strength meets Toughness (ADI-强韧结合的材料)”, 包括性能数据和应用^[6]。建立欧盟轻量化研究中心。欧盟下属机构欧洲创新与技术研究院 (European Institute of Innovation and Technology, EIT) 发起并资助建立了EIT原材料集团 (EIT RawMaterials), 这是全球原材料行业较

大的集团。它的愿景是将原材料发展成为欧洲的主要产业。其使命是通过推动创新、教育和创业精神, 使欧洲矿产、金属和材料行业在价值链上具有可持续的竞争力。EIT RawMaterials联合来自20多个欧盟国家的领先行业、大学和研究机构的120多个核心合作伙伴, 以及180多个项目合作伙伴, 活跃于整个原材料价值链, 从勘探、采矿和矿物加工到替代、循环利用和循环经济。总部位于德国柏林, 有六个创新中心: 比利时鲁汶的西部创新中心、瑞典卢碌 (Luleå) 的北部创新中心、芬兰埃斯波的波罗的海创新中心、波兰弗罗茨瓦夫东部创新中心、意大利罗马的创新中心、法国梅茨的西部创新中心^[7]。开设轻量化专业课程。由意大利扎纳迪铸造厂 (Zanardi Fonderie) 和帕多瓦大学 (University of Padua) 在其他欧洲合作伙伴的支持下, 举办由EIT原材料公司推广的面向机械行业管理人员、工程师和技术人员的在线“轻量化专业” (Light Weight Professional) 课程。该课程原定于2020年5月在扎纳迪铸造厂总部举行。由于新冠病毒疫情 (COVID-19), 改为100%在线方式免费进行, 于2020年9月16日至10月16日开课^[8]。

该课程由欧洲创新与技术研究院 (EIT) 下属的原材料集团资助的欧洲项目“Light Right”组织和授予证书, 提供在线课程, 学习形式包括自主学习的材

料和视频、在线教程、自我评估测试和考试。课程用英语授课，面向那些希望在自己的战略市场推广“轻量化”理念的经理、工程师和技术人员，领域涉及汽车工业、农业、土木工程、能源、铁路等。课程由大学教授和行业专家讲授，由弗劳恩霍夫研究所（Fraunhofer Research Institute）根据EN ISO 17024（合格评定—人员认证机构的总体要求）^[9]组织和颁发毕业证书。轻量化专业所设课程包括远程自学课程和在线教学课程两种。

远程自学课程包括：铸铁基础，铸铁的铸造过程，铸铁的热处理和ADI的生产，不同铸铁以及钢的比较，铸铁选择指南，环境、可持续性与生命周期评价（Life Cycle Assessment），铸铁工艺和性能模拟。

在线教学课程包括：材料的力学行为，实际铸造厂概述，铸铁件的疲劳设计，铸铁疲劳的缺口效应，铸铁的应变疲劳，断裂力学，扎纳迪铸造厂的一位重要客户针对一个基于轻量化的ADI零件成功应用案例的分析展示。

课程提供4次在线视频教学，还有两次远程学习阶段，另外两次是第二阶段的在线学习阶段。课程于2020年10月16日结束，并进行在线结业考试，随后颁发毕业证书。

3 等温淬火灰铸铁（AGI）

等温淬火灰铸铁具有良好的振动衰减性能，可提高强度50%以上，并提高耐磨性^[10-12]，主要应用于轴承套圈、轻载齿轮、制动件、耐磨件等机械零件。图6为用于轻型车发动机的AGI定时齿轮^[11]。

位于英国莱斯特（Leicester）的Russell球墨铸铁公司和英国一家生产液压马达的公司对Staffa径向液压马达活塞进行了等温淬火实验^[13]。Staffa径向液压马达及活塞顶杆如图7所示。

某型号Staffa径向液压马达活塞顶杆机构所设计的顶杆材质为SEA1050钢，活塞为表面淬火灰铸铁，牌号为EN-GJL-250（抗拉强度 ≥ 250 MPa），珠光体 $> 90\%$ ，硬度HBW 205~240。活塞在完成精加工后，采用一种特殊的感应淬火装置对活塞内部球面处（凹面）进行约5 mm深的表面感应淬火，淬火后硬度要求达到HRC 41~45。因工件只能一个一个处理，一件一件检验，生产效率很低。

对灰铸铁EN-GJL-250活塞进行了等温淬火试验，等温温度为315 °C。铸件经等温淬火处理后硬度为HBW269（HRC27.5），加工性能良好。精加工好的等温淬火灰铸铁活塞装机在正常工作压力275 Bar（27.5 MPa）下进行台架试验。经若干小时实验后拆机检验活塞内部球面（凹面）的硬度，由于顶杆挤压，表面组织发生应变转变为马氏体，硬度达到HRC41，满足了硬度设计要求，而且更耐磨。等温淬火灰铸铁和表面淬火灰铸铁活塞的不同在于基体组织，前者的基体组织为奥铁体，经过一段时间运行后，转变为奥铁体+少量马氏体；后者表面层为马氏体。同时对液压马达的输出功率进行了检测，结果表

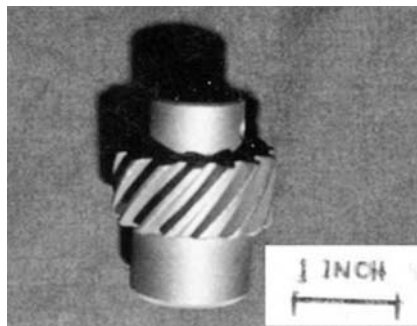
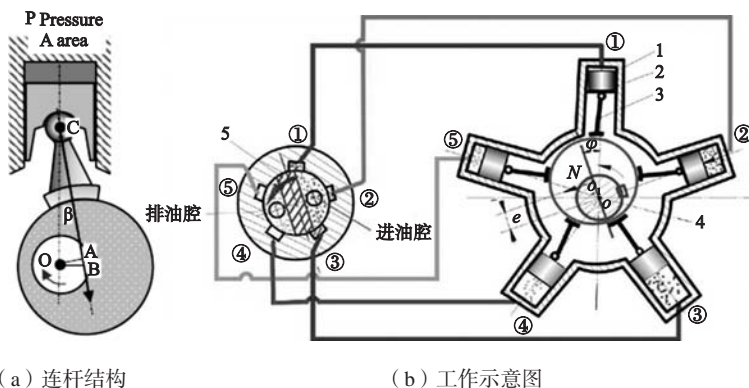


图6 用于轻型车发动机的AGI定时齿轮
Fig. 6 AGI timing gear for light vehicle engines



1.油缸 (cylinder) : ①②③④⑤ 2.活塞 (piston) 3.连杆 (con-rod) 4.偏心轮轴 (右图: 偏心轮圆心O1, 轴旋转中心O)

图7 Staffa径向液压马达油缸活塞连杆结构及工作示意图

Fig. 7 Schematic diagrams of cylinder, piston & con-rod and working process for Staffa radial hydraulic motor

明,使用等温淬火灰铸铁活塞的Staffa径向液压马达的整机输出功率提高了4%,对于机械传动效率来说,这是一个相当大的提高。

灰铁GI-250是常用的发动机气缸体材料,而CGI-450已经成为高性能发动机缸体的标准材料。德国汽车铸件生产商Eisenwerk Brühl GmbH和英国ADI Treatments^[14]正在开发一种新的材料,称之为ACE (Austempered Cast Iron for Engine Blocks,发动机缸体等温淬火铸铁)。所开发的ACE希望尽可能保留灰铁气缸体的所有优点:足够的强度,不增加浇冒口成本,良好的铸造性能。ACE材料除了增加等温热处理以外,现有的灰铸铁缸体制造工艺不受影响,具有良好的机加工性能,同时具有较好的热物理性能和平顺性(NVH, Noise, Vibration, Harshness)。

他们采用灰铁GI-250的材料,经过800~950℃不同奥氏体化温度和300~360℃不同等温淬火温度的一系列试验,确定采用较低的奥氏体化温度850℃,其中存在少部分先共析铁素体,有利于机加工。选择等温淬火360℃保证得到针状奥氏体组织,获得足够强度(340 MPa),同时又具有较好的机加工性能。由于壁厚较薄,不需加入合金元素。由于石墨是片状和硫化锰在机加工中所起的润滑作用,具有满意的机加工性能。这一点不同于CGI(硫低,不含硫化锰)和ADI(球状石墨,不含硫化锰)。关于使用刀具和切削液的研究已由亚琛大学机床与生产工程实验室进行。针对不同硬度的工件,提出了相应的加工策略,并提出了刀具、切削液和机械的最佳组合。ACE的机加工性能在Gühring公司镗孔加工中得到确认,ACE为获得最好的机加工效果,切削速度需要降低20%。

通常对于ADI产品,在等温淬火温度 T_A 以下约70℃,奥氏体组织仍然保持稳定。ACE由于较好的导热性,在 T_A 以下约50℃奥氏体组织仍然保持稳定。这意味着,对于ACE发动机可以在较高的工作温度下连续工作。

ACE由于石墨是片状,强度又比灰铁高,因而减振性能比灰铁好,是一种与NVH问题有关的最佳铸铁材料。

为了考察摩擦学适用性,在汉诺威为大众赛车(VW motorsport)生产了4缸2.0I TFSI系列汽油发动机,随后,在“更加严苛”的条件下,在发动机试验台上检查运行质量和磨损情况。之后,在试验台上进行试验的发动机安装到车上进行长期验证,并在KTMX Bow跑车上进行了赛车工况下的运行实验。

4 等温淬火蠕墨铸铁(ACGI)

Ramadan^[15]的研究表明,与ADI相比,等温淬火CGI(ACGI)具有较大的铁/石墨界面面积。ACGI较之ADI在等温淬火初期,保留奥氏体的增加率较高。Panov^[16]的研究表明,CGI的等温淬火使其强度特性提高了一倍以上,而且由于良好的铸造性能,其抗变形抗力、阻尼性能得到了显著提高。

瑞典延雪平大学R. Ghasemi^[17]等研究了铁素体CGI等温处理的效果,发现较之铁素体CGI,在275~375℃的温度下进行的等温淬火使ACGI的硬度、抗拉强度和屈服强度显著提高,屈服强度从铸态CGI的338 MPa提高1倍以上,但伸长率下降。随着温度从275℃增加到375℃,奥氏体组织明显粗化。瑞典延雪平大学Wollmann^[18]等研究了ACGI和CGI与珠光体灰铸铁的滑动摩擦,发现等温淬火CGI较之原珠光体蠕墨铸铁的硬度提高了30%,但在滑动摩擦中平均摩擦系数基本相同,约为0.11,而普通CGI的磨损程度要比ACGI严重。

由于ACGI具有良好的铸造性能、更高的强度和耐磨性,因此预期在要求高强度、高耐磨性等领域有很好的应用前景。德国Eisenwerk Brühl GmbH公司计划开发的缸体材料除了ACE(340 MPa)以外,还包括ACE2(>550 MPa),即强度大于550 MPa的等温淬火蠕墨铸铁ACGI^[14],所开发的气缸体不仅针对直列缸体也包括V型气缸体。据了解他们原本要在2020世界铸造组织韩国会议上作报告,但由于新冠肺炎疫情而推迟,可是开发工作仍然在继续进行。

5 结束语

(1)世界范围内ADI已经研发了近50年了,但是持续不断的轻量化创新一直在进行,应用一直在不断扩大,品种一直在不断增加。我国应进一步加大ADI产品研发的力度,包括直接替代、产品优化和组装件的整合集成。

(2)借鉴国外经验,联合生产企业、行业学会、协会、科研院所等,争取国家支持,举办各种ADI轻量化学习班,邀请汽车、矿业、农业、建筑、采矿、石油天然气、电力、交通运输、铁路等各行各业的管理人员、设计人员、工程师、采购和技术人员,以及铸造业的管理、销售、技术人员参加,通过培训并颁发毕业证书,以此进一步开发和推广ADI的应用。

(3)近年来国外对等温淬火灰铸铁AGI和等温淬火蠕墨铸铁ACGI都开展了研发工作,并取得一定进展,我国需要关注和开展相关的研发工作。

参考文献:

- [1] ARRON Rimmer. ADI solutions aid vehicle design [J]. Foundry Trade Journal, 2004 (3) : 54–56.
- [2] ERIK Hepp, MARAT Dzusov, WILFRIED Schäfer, et al. Autonomous optimization of an ADI casting [C]//2016 World Conference on Austempered Ductile Iron, The Westin Peachtree Plaza – Atlanta, GA, USA, 2016 (10) : 27–28.
- [3] ZAC Brook, ANGELLA Sell. A Story of Light weighting in the railroad industry [C]//2016 World Conference on Austempered Ductile Iron, The Westin Peachtree Plaza – Atlanta, GA, USA, October 27–28, 2016.
- [4] A modern casting staff report 2003 casting contest: innovations in casting design [J]. June Modern Casting, 26.
- [5] hppts: //appliedprocess.com
- [6] ADI Strength meets Toughness, ADI-austempered ductile iron: the benchmark engineering material [R]. Euro ADI Promotion, 2000.
- [7] https: //eitrawmaterials.eu/.
- [8] https: //zanardifonderie.com/wp-content/uploads/2020070-LIGHTWEIGHT-EN.pdf.
- [9] International Standard ISO/IEC17024: Conformity assessment — General requirements for bodies operating certification of persons [S].
- [10] KOVACS B V, KEOUGHJ R. Physical properties and application of austempered gray iron [R]. AFS Transactions, 93–141 (1993) , 283–291.
- [11] JUSTIN Lefevre, KATHY L, Hayrynen. Austempered materials for powertrain applications [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, Journal of Materials Engineering and Performance, 2013, 22 (7) : 1914–1922.
- [12] RUNDMANK B, PAROLINI R, MOORED J. Relationship between tensile properties and matrix microstructure in austempered gray iron [R]. AFS Transactions, Paper 05-145 (5) 2005: 1–15.
- [13] 龚文邦, 刘金城, 向纲玉. 等温淬火球墨铸铁 (ADI) 理论、生产技术及应用 [M].北京: 机械工业出版社, 2020.
- [14] ERIC Fritsche, EISENWERK, ARRON Rimmer, Heat-treated cast iron – austempered cast iron for engine blocks: A high-performance material for high-performance engines [J]. Foundry Trade Journal, 2014 (10) : 269–273.
- [15] RAMADANM, NofalAA, ElmahalawiI, et al. Comparison of austempering transformation in spheroidal graphite and compacted graphite cast irons [J]. International Journal of Cast Metals Research, 2006, 9 (3) : 151–155.
- [16] PANOVA G, GURTOVOY D A, SHAEKHOVAI F. About the possibility of increase in CGI properties by austempering [J]. Solid State Phenomena, Trans Tech Publications, Ltd., 2018, 284 (10) : 224–228.
- [17] ROHOLLAH Ghasemi, INAMUL Hassan, ARVIN Ghorbani, et al. Austempered compacted graphite iron – influence of austempering temperature and time on microstructural and mechanical properties [J]. Materials Science and Engineering A, 2019, 767 (11) : 138434.
- [18] WOLLMANNDaniela, PINTAUDEGiuseppe, GHASEMI Rohollah. Effect of austempering treatment on lubricated sliding contact of compacted graphite iron [J]. SN Applied Sciences, 2020 (2) : 1947.

The Latest Overseas Trends on ADI, AGI and ACGI Research and Development

LIU Jin–cheng¹, GONG Wen–bang²

(1. ADI Committee, Chinese Foundry Association, Beijing100044, China; 2. College of Mechanical Engineering & Automation of Wuhan Textile University, Wuhan 430200, Hubei, China)

Abstract:

This paper describes some new trends of foreign ADI product development, including examples of direct substitution, product optimization and integration of fabricated components, and introduces some effective and up-to-date practices adopted by some ADI manufacturers, including the European Union, to open up the application market of ADI. The new development trends and application prospects of austempered gray iron (AGI) and austempered compacted graphite iron (ACGI) are also introduced.

Key words:

austempered ductile iron (ADI); austempered gray iron (AGI); austempered compacted graphite iron (ACGI); R & D trend