

# 等温淬火球墨铸铁研发工作的进展与发展趋势

曾艺成<sup>1</sup>, 李克锐<sup>2</sup>, 张忠仇<sup>2</sup>, 徐明君<sup>1</sup>, 卫东海<sup>2</sup>

(1. 机械科学研究总院, 北京 100044; 2. 郑州机械研究所, 河南郑州 450052)

**摘要:** 论述了近年来等温淬火球墨铸铁 (ADI) 及含碳化物的等温淬火球墨铸铁 (ADI) 产业的发展状况。介绍了铸态奥铁体球墨铸铁研究的新动向。指出了ADI产业发展存在的问题。分析了当前国家对制造业、汽车节能环保、轻量化政策的实施, 为ADI材料带来了极好的发展机遇并预测了ADI在我国的发展趋势。

**关键词:** 等温淬火球墨铸铁 (ADI); 进展; 发展趋势

**中图分类号:** TG143.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2017) 09-0940-08

## The Progress and Development Trend of Austempered Ductile Iron

ZENG Yi-cheng<sup>1</sup>, LI Ke-rui<sup>2</sup>, ZHANG Zhong-chou<sup>2</sup>, XU Ming-jun<sup>1</sup>, WEI Dong-hai<sup>2</sup>

(1. China Academy of Machinery Science & Technology, Beijing 100044, China; 2. Zhengzhou Research Institute of Mechanical Engineering, Zhengzhou 450052, Henan, China)

**Abstract:** The development of ADI and CADI for recent years was reviewed. The new trend of as-cast ADI was introduced. The problem of ADI industry was pointed out. The policies implementation of manufacturing, automobile energy saving, environmental protection and light weight will provide good development chance for ADI. The development trend of ADI was predicted in China.

**Key words:** austempered ductile iron; progress; development trend

等温淬火球墨铸铁 (ADI) 具有强度高 (牌号 QTD1600,  $R_m > 1\ 600$  MPa)、塑性好 (牌号 QTD800-10,  $A > 10\%$ )、动载性能高 (弯曲疲劳强度达 420~500 MPa, 接触疲劳强度达 1 600~2 100 MPa)、耐磨性及吸震性好等许多优点, 发展很快, 应用范围逐步扩大。国外 ADI 的应用, 以汽车零件为主, 约占 45% 以上, 特别是重型卡车的底盘零件, 应用很多, 如美国每辆重型卡车中至少应用 500 kg ADI 零件。

据测算, 到 2016 年, 我国 ADI (包括 CADI) 年产量约 15 万 t, 其中工程结构件和抗磨、耐磨件 (包括 CADI 磨球和奥贝磨球等) 大约各占一半。工程结构件包括汽车悬挂件、支架、控制臂、转向节、铁路机械、农机和工程机械零件及齿轮、曲轴等。

ADI 的生产由球铁坯件、热处理和机加工等三个主要环节组成, 而提供健全、质量稳定的球铁坯件是基础。

近年来, 我国球铁生产技术取得很大进步, 球铁的性能、质量水平和质量稳定性有很大提高。

(1) 原、辅材料供应和质量有了很大改善, 特别是高纯生铁的大量供应, 杂质元素含量很低, 铁液纯净度高, 使我国球铁长期存在的塑 (韧) 性指标比国外同牌号低的情况得以改善;

(2) 发展和改善各种处理技术, 如盖包法、喂线法处理等不断推广应用, 使用富钒球化剂和高钒钙孕育剂, 使石墨球的圆整度、大小、数量得到有效控制;

(3) 生产工序的严格控制, 使球铁质量的稳定性提高; 超声波、表面磁粉、射线探伤等无损检测技术的应用, 特别是在批量生产时实现在线检测, 保证了每一件产品的质量。

球铁生产技术的进步, ADI 毛坯的质量及其稳定性已有保证。可以预测未来几年内, ADI 的推广、应用将会得到更大的发展。

## 1 ADI 研发、生产应用进展

### 1.1 ADI 在汽车工业上的应用将成为我国 ADI 产量新的增长点

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目前国内 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, 产量也大幅上升。如一汽军车左右羊角、越野车左右前控制臂、左右后控制臂, 东风汽车的钢板弹簧导向座、越野车悬挂系统零件等。

收稿日期: 2017-06-30。

作者简介: 曾艺成 (1934-), 男, 教授级高工, 主要从事铸铁领域的技术研究。E-mail: foundry@263.net; zengyich@sina.com

2006年东风汽车公司技术中心曾开发高机动性军用特种越野车，为强化车体，提高车辆运载能力、通过性和车辆稳定性，对14个悬架类铸钢件改用ADI件，并进行轻量化设计。每辆份试制零件总重量由630.62 kg，减少到380.66 kg，共减轻249.96 kg，减重率为39.6%，对应零件成本降低22%<sup>[1]</sup>。

近年东风汽车公司与苏州艾普公司合作，进行ADI在某基础车型越野车底盘悬挂件上应用的研发工作<sup>[2]</sup>。为使ADI性能得到最大发挥，采用CAE软件对底盘悬挂零件结构进行优化设计，以ADI1050级材料替代铸钢，14种25件总重415 kg，比原结构件减轻150 kg，减重率26.5%。图1是其中结构优化后的ADI上横臂平均壁厚12 mm，重20.8 kg（原结构，平均壁厚20 mm，重30.6 kg）。MAGMA公司对一系列球铁铸件进行优化设计<sup>[3]</sup>，其中ADI转向节比原球铁铸件减轻19%（图2）。

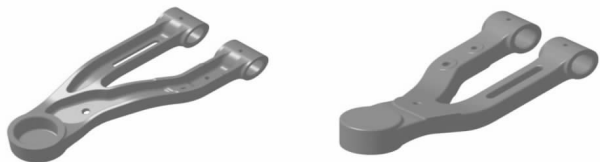


图1 结构优化设计后的ADI上横臂  
Fig.1 ADI upper cross arm casting

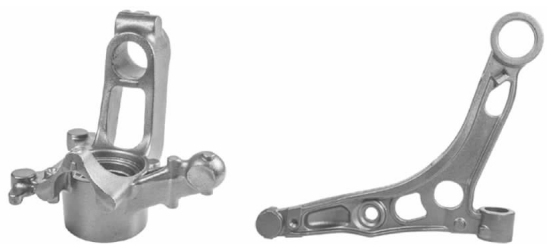


(a) 原结构 (b) 优化后的结构

图2 转向节铸件

Fig. 2 The knuckle casting

意大利Zanardi铸造公司采用轻量化设计<sup>[4]</sup>，将ADI JS/900-8用于轻型商用车悬挂件代替球铁（图3），转向节重量从11 kg减为8.96 kg；悬挂臂重量从8 kg减为6.98 kg，每车各两件，总重量节约6.12 kg，减重率16.1%。



(a) 转向节 (b) 悬挂臂

图3 转向节和悬挂臂

Fig. 3 The knuckle and suspension arm

ADI铸件替代铝合金件、冲压钢件、钢板切割、冲压、冲孔和焊接件，图4为用ADI支架（右）替代铝合金支架（左）解决了一款车的舒适性（噪音小）问题。图5中左边的ADI轮毂替代右侧的金属型铸铝轮毂，降低50%的内涵能源，重量减轻4%。图6为ADI控制臂（右）替代冲压钢件（左），减重6%，性能测试超预期。

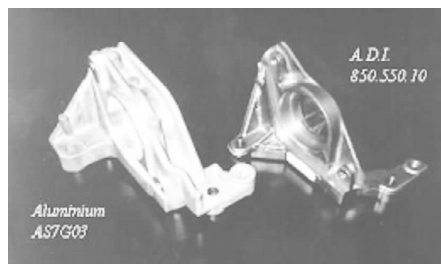


图4 支架铸件

Fig. 4 The bracket casting

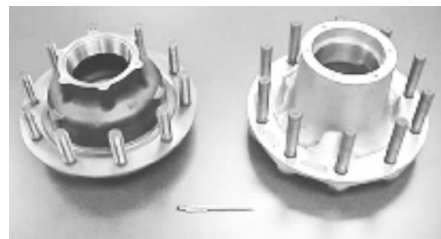


图5 轮毂铸件

Fig. 5 The hub casting

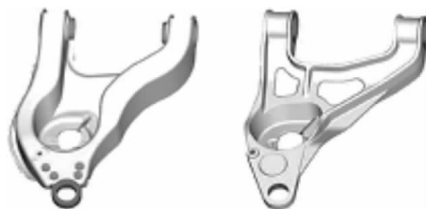


图6 控制臂铸件

Fig. 6 The control arm casting

随着国家对治理污染、节能减排环保政策监督和执行力度的加强，强制性国家标准《汽车、挂车及汽车列车外廓尺寸、轴荷及质量限值（GB1589—2016）》的发布实施，汽车轻量化的要求越来越严格。有关部门对各种规格型号的汽车具体规定了轻量化率指标，汽车自重已经到了斤斤计较的地步。汽车行业在加强对铝镁合金轻金属材料应用研究的同时，也将目光关注到强度重量比高的ADI材料。某些汽车公司已专门成立了轻量化工作部。

此外，国家路政、交管等部门加强公路超载超限治理，从今年起严格限制载重汽车超载。业内人士预计，由于公路货物运输总量不会有太大变化或有一定增长，去掉超载因素，今年载重卡车的需求和产销量将有很大增加。汽车工业的发展及汽车轻量化为我国ADI材料提供了极大地发展机遇。

## 1.2 ADI新产品的研发

(1) 渣浆泵壳体、后桥前轴。河南欧迪艾铸造有限公司这一阶段又开发了许多ADI新产品。其中为美国客户研发的原油渣浆泵泵壳(图7),以ADI1600-1300-1(ASTM A897)代替原高铬铸铁作为耐磨材料选用,在硬度相当的情况下(HRC50~60),其冲击韧性较高铬铸铁提高1倍(见表1)<sup>[5]</sup>。



图7 渣浆泵壳体

Fig. 7 The shell of slurry pump casting

表1 ADI1600-1300-1材料与高铬铸铁性能对比

Table 1 The properties comparison of ADI1600-1300-1 and

high-chromium cast iron

材质	硬度HRC	冲击韧度/(J·cm <sup>2</sup> )
高铬铸铁	50~60	4~6
ADI1600-1	50~57	≥10

ADI泵壳体研发后,首批提供给客户的5套产品发往美国进行试验。力学性能等各项指标均满足标准要求,泵送系统运行效果达到用户的预期要求,下达了正式订单。已为客户提供300套泵壳体组件,无一不良质量反馈。该件获2016年北京国际铸造博览会优质铸件金奖。

图8是为一汽试制的60 t载重汽车ADI后桥前轴,质量为270 kg,长度>1.8 m,平均壁厚30 mm,最大壁厚70 mm,本体抗拉强度925 MPa,伸长率10.4%。



图8 60 t载重汽车ADI后桥前轴

Fig. 8 60 t rear axle of truck ADI casting

该件曾获2014年北京国际铸造博览会优质铸件特别金奖<sup>[6]</sup>。

(2) ADI砼泵弯管。焦作固德联合机械有限公司研发了混凝土(砼)输送泵用的ADI弯管(图9)。采用富钒球化剂盖包法球化处理,高钡钙孕育剂孕育,垂直分型铁型覆砂铸造工艺(图10),铸件经等温淬火处理,力学性能达到QTD1600-2牌号要求,硬度HRC 47~50,冲击韧度≥70 J/cm<sup>2</sup>(无缺口)。ADI弯管的耐磨寿命为运输混凝土(4~5)万m<sup>3</sup>,是高锰钢(Mn13)1.5万m<sup>3</sup>的3倍,其冲击韧度远大于高铬铸铁,出厂前经18 MPa水压试验,不破裂。与目前市场上普遍使用的高锰钢弯管和最近出现的高铬铸铁-型钢双层复合弯管相比,ADI砼泵弯管的性价比最高,最具竞争优势。该件曾获2016年北京国际铸造博览会优质铸件金奖<sup>[7]</sup>。



图9 砼泵弯管

Fig. 9 The concrete pump bend casting



图10 铁型覆砂生产线

Fig. 10 The metal mold precoated sand production line

(3) ADI太阳能跟踪装置。图11所示为ADI太阳能跟踪装置,该装置由美国设计,采用几件合金钢铸件热处理后加工焊接,其中齿圈与其连接部分为了防止工作时松动,采用热压配合。重新设计改用ADI铸件一次做成,重量从67 kg减为43 kg,较大地提高了装置的尺寸精度,缩短工时,降低成本。该件由溧阳虹翔公司铸造、加工,苏州艾普公司热处理,产品全部出口美国,现在每月生产15 000套,年产约3 000 t<sup>[8]</sup>。



图11 ADI太阳能跟踪装置

Fig. 11 The solar tracking device ADI casting

(4) 江苏溧阳市金桥机械制造有限公司将ADI材料应用于工程机械和农业机械,近年来试制108种ADI件,已批量生产38种,2016年生产1 300 t,占公司铸件总产量10%。ADI件由该公司铸造、加工,苏州艾普公司热处理,产品全部出口国外。

(5) 农机用等温淬火球铁避震器<sup>[9]</sup>。安徽合力股份有限公司合肥铸锻厂与苏州艾普公司合作,进行ADI避震器的研制。该件为某农机避震系统关键部件,如图12所示,材质为QTD900-8,单重160 kg,最大壁厚140 mm。铸件毛坯要求通过X射线探伤1级,球化率 $\geq 85\%$ ,石墨球数 $\geq 100$ 个/mm<sup>2</sup>。

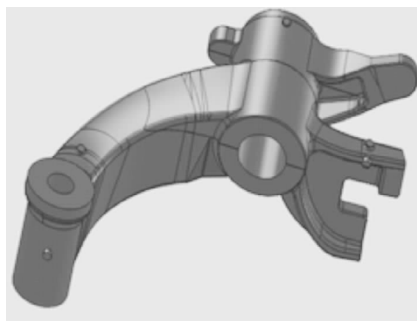


图12 避震器铸件

Fig. 12 The shock absorber ADI casting

通过采用低稀土球化剂、树脂砂造型、厚大部位增加冷铁、使用石墨型增碳剂、包内孕育+随流孕育+型内孕育三次孕育等措施,避免了铸件厚大部位心部碎块状石墨产生、石墨球数不足以及内部缩松等问题,使铸件毛坏球化率、石墨球数和X射线探伤等级均达

到客户的要求。铸件热处理后,力学性能达到QTD900-8牌号的要求。

(6) SEW (天津) 公司用ADI制造带内齿轮的结构件(图13),在市场上具有很强的竞争力<sup>[10]</sup>。

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,图14为齿圈的一扇形段,轮廓尺寸为1200 mm $\times$ 850 mm $\times$ 350 mm,重950 kg、最大壁厚80 mm。图15为齿圈相配的小齿轮,尺寸为 $\Phi 760$  mm $\times$ 400 mm,重710 kg,最大壁厚140 mm。在中国天津建厂后,年产ADI件超过1 000 t。其产品主要为齿轮和轴。

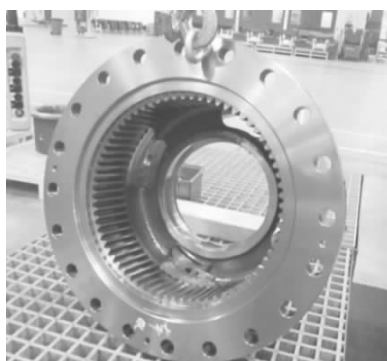


图13 带内齿圈的结构件

Fig. 13 The structure part with inner ring gear

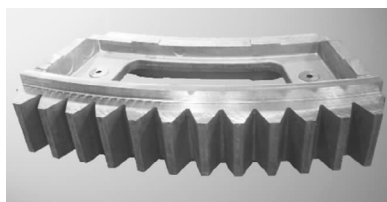


图14 齿圈的一扇形段

Fig. 14 The sector segment of ring gear



图15 齿圈相配的小齿轮

Fig. 15 The gear casting

(7) 江苏万力机械股份有限公司与苏州艾普公司合作,用铁型覆砂工艺铸造多缸曲轴毛坯,加工后由苏州艾普公司进行热处理,生产ADI曲轴数千件,全部出口美国。

(8) ADI后桥螺旋伞齿轮产业化生产的进展。

ADI后桥螺旋伞齿轮是20世纪70年代最初研发的ADI产品,美国和中国最早研发和使用,但产业化问题始终没有得到很好解决,然而试验和研究工作一直没有停止。吉林奥铁科技股份有限公司、中国第一汽车集团股份有限公司和清华大学合作立项继续研发。以ADI螺旋伞齿轮应用于汽车后桥主减速器上,并形成产业化,实现高质量低成本,通过对ADI螺旋伞齿轮的材质特性、铸造工艺、热处理工艺、切削工艺、喷丸强化等工艺的研究,形成能稳定生产ADI螺旋伞齿轮的产业化生产工艺,使ADI螺旋伞齿轮真正应用到主机上。目前该项目已取得阶段性成果。

(9) 湖北省机电研究设计院股份公司对ADI900材料的低温性能进行了试验研究。试验结果表明:随着温度的降低,材料的力学性能有较大变化。在 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,相对于常温条件抗拉强度提高19.8%,伸长率下降33.0%,冲击韧度下降超过70%,降为 $31\text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ ,硬度提高18.4%<sup>[11]</sup>。

### 1.3 CADI磨球产量取得较大进展

CADI磨球从研发至今已有多年,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,使用结果证明,CADI磨球与高铬铸铁磨球、低铬铸铁磨球相比,具有磨耗低、破碎率低和节电、噪音低等优点(表2)<sup>[12]</sup>。

表2 CADI、高Cr、低Cr磨球性能对比

Table 2 The properties comparison of CADI, high-Cr, low-Cr grinding ball

性能	CADI球	高Cr球	低Cr球
表面硬度HRC	使用前56~58,使用后>62	56~60	45~50
冲击韧度/( $\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ )	>10	$\geq 2.5$	$\geq 1.6$
磨耗(铁矿石)/( $\text{g}\cdot\text{r}^{-1}$ )	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条铁型和铁型覆砂磨球生产线,4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 $\Phi 40\text{ mm}$ 、 $\Phi 50\text{ mm}$ 、 $\Phi 60\text{ mm}$ 、 $\Phi 80\text{ mm}$ 、 $\Phi 100\text{ mm}$ 、 $\Phi 120\text{ mm}$ 、 $\Phi 130\text{ mm}$ 和 $\Phi 150\text{ mm}$ 甚至 $\Phi 180\text{ mm}$ 的CADI磨球。该公司具有年产5万t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化合物等生产的CADI磨球,在使用中也取得很好的效果。

根据国内外市场情况,CADI磨球的发展趋势有以下几方面。

(1) 规范生产工艺,形成CADI磨球成套生产技术(包括设备),保证磨球质量,逐步扩大市场。

(2) 其应用范围应由铁矿逐步向铜矿、金矿、水泥、煤炭等方面扩展。

(3) 由国内市场转向国外市场。

(4) 为保证质量,降低成本,在球铁毛坯质量解决之后,热处理工艺与装备便成为关键。

近几年来,围绕年产1万t的磨球专用热处理生产线的建立,中国铸协耐磨铸件分会与ADI技术委员会曾先后组织7家热处理设备厂进行讨论,提出各种方案进行比较,对热处理生产线的要求是:生产能力为每年1万t以上;表面硬度HRC>56;圆周方向硬度差<HRC2;边缘和心部硬度差<HRC3;连续生产;符合环保要求。

通过几年努力,迁西奥帝爱、河北承德求业、开封电炉厂等都建立了不同类型的磨球专业生产线,在生产中发挥了良好的作用,使CADI磨球逐步走向质量稳定、规模化生产<sup>[13]</sup>。

### 1.4 ADI (CADI) 在抗磨耐磨零件上应用取得突破

据统计,我国抗磨耐磨件年总消耗量为300多万t,占铸件总产量8%,其中抗磨件占70%,即每年要消耗100多万t磨球,几十万t衬板、齿板,市场很大。ADI不但强度高,韧性好,且具有很好的耐磨性。一些资料报道,HBW300的ADI零件其耐磨性能比HBW500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6年前就开始用ADI齿板和衬板代替高锰钢(图16)。使用结果表明,ADI衬板在 $\Phi 4\text{ m}$ 以下球磨机上应用,其使用寿命比高锰钢高1~3倍, $\Phi 1\text{ 200 mm}\times 900\text{ mm}$ 以下破碎机用ADI齿板,也比高锰钢寿命高2倍以上,目前已大量使用。2013年产量在2 000 t以上。 $\Phi 6\text{ m}$ 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 $\Phi 4\text{ m}$ 以下球磨机采用ADI衬板, $\Phi 4\text{ m}$ 以上球磨机衬板采用贝氏体钢。

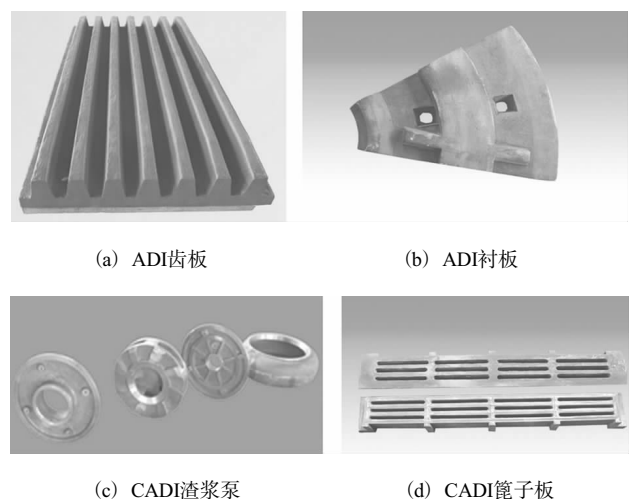


图16 ADI及CADI铸件

Fig. 16 The ADI and CADI casting

除衬板、齿板外，像渣浆泵壳体等零件、混凝土泵输送管弯头、篦子板等（图16），采用CADI、ADI都取得较好效果，已小批量生产<sup>[13]</sup>。

## 2 专业等温淬火热处理中心

自从美国AFC引进的可控气氛密封箱式多用炉（见图17）生产线安装在苏州艾普零件制造有限公司，并于2007年上半年调试成功后，我国开始有了专业化热处理中心。

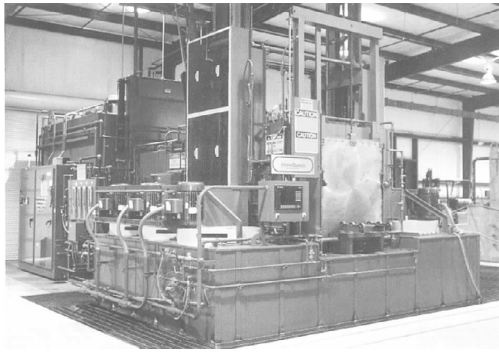


图17 美国AFC公司的ADI热处理设备  
Fig. 17 The ADI heat treatment device of AFC

美国和欧洲的经验证明，等温淬火热处理中心的建立促进ADI产业化发展。由于热处理中心装备有先进的等温淬火生产线，对ADI的化学成分、牌号、标准、铸件结构、热处理工艺等都有较深入的了解，因此能保证产品的质量及环保友好，费用又合理，使得许多中、小型球铁厂通过合作也能生产各种优质的ADI件。美国ADI零件有70%以上是由专业ADI热处理中心完成的。

A.P.（苏州）建厂后，开始承接以ADI为主的各类钢铁金属材料的等温淬火处理。几年来，A.P.（苏州）公司积极配合我国企业ADI产品开发、试验和生产，发挥巨大作用，促进了我国ADI的发展。多年来的实践证明，专业等温淬火热处理中心的建立为我国ADI的发展发挥了重要作用，做出了很大贡献。

除苏州外，河北迁西奥帝爱机械铸造有限公司也于2007年从上海宝华威热处理设备有限公司购买了2条美国AFC生产的可控气氛密封箱式多用炉等温淬火生产线，并于2010年6月投入生产，在我国华北建成一个等温淬火热处理中心。CADI磨球和ADI衬板、齿板试验成功投产后，该公司于2012年、2013年又增加一条4t大型等温热处理生产线和年产1万t CADI磨球专用等温淬火热处理生产线，成为目前国内最大的等温淬火热处理中心。

2014年，河南欧迪艾铸造有限公司也从上海宝华威热处理设备有限公司购买了1条美国AFC生产的可控

气氛密封箱式多用炉等温淬火生产线，并于2015年初投产。

用硝盐进行等温淬火热处理有很多优点，但设备投资较大，运行成本较高，特别是CADI磨球，本身价值不高，对表面质量和尺寸公差要求也不严，因此国内有些单位提出分级等温淬火工艺。

多种分级淬火工艺及生产线已进入调试和试生产阶段。主要有：大连三明重型车制造有限公司的盐浴分级淬火工艺生产线；中国农业大学和开封电炉厂合作开发的分级淬火生产线；上海宝华威热处理设备有限公司和河北承德求业钒钛抗磨科技材料有限公司合作的磨球热处理生产线；北京京奥泰尔公司与有关厂研发的分级淬火生产线。

## 3 铸态奥铁体球墨铸铁研究的新动向

近年来，随着检测方法、模拟技术和监控手段等方面迅猛发展和广泛应用，一些工业发达国家的科研工作者开始意识到，如能按铸件成分和对材质要求绘出相应的冷却曲线、奥氏体连续冷却曲线（CCT曲线）或等温转变曲线（TTT曲线）；再根据铸件凝固后的冷却条件，实际测定冷却过程中各部位温度的变化；然后，采用可控的冷却方式，使铸件各部位按设定的冷却速率冷却。这样一方面可以使铸件冷却过程中各部位的温差很小，结构复杂、壁厚差别较大的铸件也不需要消除内应力退火。另一方面，可以控制球墨铸铁的基体组织，铸态条件下生产各种牌号的球铁件和ADI件。实施这项工艺，涉及的问题很多，过程也很复杂，但却有节能、减排和提高工效等多方面优点，因此，提出后不久就受到广泛关注。采用“控制冷却工艺”（engineered cooling）代替等温淬火，在铸态下获得奥铁体基体的试验工作正在开展<sup>[14]</sup>。

美国铸造协会（AFS）与Missouri科技大学合作开展一项研究工作，课题是“采用控制冷却工艺生产高强度铸铁件（High Strength Cast Iron Castings Produced by Engineered Colling）”。这项研究工作由美国铸造协会、Missouri科技大学、Elkem公司、kohler公司、Dotson铸铁公司、Selee公司等单位提供资金支持。研究工作的第一阶段是用控制冷却工艺替代等温淬火，在铸态下获得基体组织为奥铁体（ausferrite）的球墨铸铁。目前，研究工作的第一阶段已经完成，设计了一种计算机辅助的控制冷却方法，采用既可以喷射空气、也可以喷水的广角喷雾器，其冷却强度可控。模拟中，由表面温度的反馈控制冷却。用这种模拟方法，可得到要求的冷却速率，铸件内的温度梯度很小，而且表面温度可以不低于要求的值。用它来控制早落砂的球铁件（按：落砂温度的上限是固相线以下50℃，下限是共析转变温度以上50℃），就可以得到奥铁体

的基体组织。虽然仍然存在一些问题,实际用于生产仍有待进一步完善,但已确认了这项工艺的可行性,球墨铸铁铸态下的抗拉强度从原来的550~600 MPa,提高到1 000~1 050 MPa,伸长率能达到4%<sup>[15]</sup>。

最近,在美国Ohio州立大学和Alabama大学任职的Stefanescu D. M.与西班牙铸造行业的几位同仁合作,也进行了有关铸态奥铁体球墨铸铁方面的研究工作。为了更好地应对铸件壁厚对冷却条件的影响,提出了按铸件的模数调整落砂温度和等温保温温度的计算式<sup>[16]</sup>。

#### 4 2016年世界ADI论坛

2016年10月在美国乔治亚州亚特兰大市举办了世界ADI论坛,美国、中国、英国、意大利、德国等国家的专家、学者参加了会议。论坛主要交流和讨论了三个方面的问题。

(1) 中国、意大利、美国、英国代表研发ADI件应用于汽车及各种机械零件,使之轻量化。ADI的应用已由一般的简单替代铸钢、锻钢,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手段优化零件结构,或将多件钢焊接、装配件改为整体ADI件,达到减小零件壁厚、减轻重量、节能节材、减少工时和降低成本的目的。

E. Nelson<sup>[17]</sup>在论文中列举了应用ADI的四个优势:减轻重量;代替焊接件,增加刚性和尺寸稳定性;改善生产工艺流程,提高产量;以优异的性能作为原材料的升级材料。

文中同时列举了相应的例子,如:由15个零件焊接而成的支架改为一个整体ADI零件(图18),重量减轻4 kg,减重18%,在装配线运输过程中不变形。



(a) 焊接件

(b) ADI铸件

图18 支架

Fig. 18 The bracket

(2) 美国、德国等代表对ADI材料的加工性能与球铁、钢(AISI 4340)进行比较研究,对ADI材料的切削工艺和刀具选用提出建议。

(3) 美国(J. R. Keough)<sup>[18]</sup>提出薄壁铸件用打印技术,采用无机化合物作粘接剂的砂型在线快速生产问题。介绍美国现代金属制造技术创新(LM3I)轻量化,包括ADI在内的球铁件最小壁厚可为3 mm(2.5 mm)。ADI材料由于强度重量比优于普通球铁、铸钢、锻钢,

甚至铝合金,在机械零部件轻量化方面处于竞争优势,ADI材料的发展前景十分广阔。

#### 5 存在的问题

(1) ADI件质量的稳定性、一致性仍是目前需要解决的突出问题。铸件质量的稳定性、一致性,不仅是ADI件,也是整个铸件生产的关键问题。铸件越重要、要求越高,稳定性也要求越严。

早期ADI用于铁路磨耗板,看似简单的铸件,ADI的抗磨效果也很好,但是由于个别单位不重视产品质量,使用过程中出现问题,为此铁道部下文明令禁止使用,极大地影响了ADI材料的声誉。

要想质量稳定,首先必须要树立质量第一的理念,排除一切影响质量的因素,在技术问题解决之后,必须加强管理。只有严格控制生产过程每个工艺环节,对重要的保安件必须经过100%的在线无损检测,才能最终保证产品的质量。

(2) ADI标准宣贯、主动设计选用方面仍嫌不足。国际标准《铸造奥铁体球墨铸铁分类(ISO 17804; 2005)》和国家标准《等温淬火球墨铸铁件(GB/T 24733—2009)》已经发布多年,ADI经过几十年的生产、应用,积累了丰富的生产经验和数据,但ADI材料性能特点、工艺、生产和应用仍然不为大多数工程设计人员所掌握。因此有必要加强ADI标准的宣贯,材料学会、铸造学会、汽车学会等学术组织和高等院校应该加强ADI材料的教育和知识普及。改变以往模仿国外某ADI零件的现状为主动设计选用。汽车及其他机械零部件轻量化政策的实施将大大推动ADI材料的设计选用。

(3) ADI产业化生产缺乏良好的发展平台。目前影响我国ADI产业化生产的主要问题是产业链没有很好建立起来,缺乏一个良好的发展平台<sup>[19]</sup>。

实践证明,ADI是一种综合性能非常优异的工程结构材料,有很广阔的应用前景,但是任何一种新材料要大量推广应用,仅有好的性能是不够的,必须同时具有大量生产的质量稳定性,以及良好的经济效益,才能顺利进行。

要使ADI实现产业化生产,牵涉到标准制定、零件设计、原材料、铸造、热处理、机械加工、质量检验、运输和商贸等一系列问题。因此,在2008年召开的“首届等温淬火球铁(ADI)产业论坛及研讨会”上,提出在市场经济条件下,构建ADI产业化发展平台,用经济手段协调解决ADI产业化生产过程中遇到的各类问题的构想,但未能实现。

#### 6 结束语

(1) 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手段优化零件结构,或将多件钢焊接、装配件创新改为整体件,达到减小零件壁厚、减轻重量、节能节材、减少工时和降低成本的目的。机械零部件的轻量化和材料升级及结构创新是ADI的发展方向。

(2) 汽车工业的发展及汽车轻量化为我国ADI材料提供了极大的发展机遇。可以预测,今后我国ADI材料应用领域将不断扩大,ADI件的品种、产量将继续呈现快速增长的发展趋势,ADI在我国的发展前景十分广阔。

(3) ADI技术委员会今后的主要工作仍是积极支持ADI新产品的开发;积极支持专业等温淬火热处理中心的运作;积极支持ADI专业生产厂的工作以及努力协助ADI产业化生产发展平台的构建和运作。

#### 参考文献:

- [1] 刘建伟. ADI在汽车发动机传动齿轮和底盘结构件上及应用 [C]// 2008年首届等温淬火球铁 (ADI) 产业论坛及研讨会, 北京: 39-43.
- [2] Li Tao, Andy Chen. Application of ADI for suspension components in off-road vehicles [C]// Ductile Iron Society 2016 World Conference on ADI, USA: 2016.
- [3] Erik Hepp. Autonomous optimization of an ADI casting [C]// Ductile Iron Society 2016 World Conference on ADI, USA: 2016.
- [4] Zanardi F, Veneri E. Austempered ductile iron for lightweight suspension components in light commercial vehicles [C]// Ductile Iron Society 2016 World Conference on ADI, USA: 2016.
- [5] 张民堂, 王成亮. ADI渣浆泵壳体的研制与生产 [C]// 2017高端铸铁件熔炼和处理技术论坛暨第六届全国等温淬火球铁 (ADI) 技术研讨会, 郑州, 2017: 102-104.
- [6] 巩济民, 万仁芳, 于永来. 从2014年北京展会看我国铸造企业的发展 [J]. 现代铸铁, 2015, 35 (1): 19-22.
- [7] 李朝霞, 杨文杰, 闫启栋. ADI砼泵弯管的研发生产及含镧球化剂的应用 [C]// 2017高端铸铁件熔炼和处理技术论坛暨第六届全国等温淬火球铁 (ADI) 技术研讨会, 郑州, 2017: 111-114.
- [8] 吕燕翔, 吴启洪. 等温淬火球铁太阳能装置顶板的开发 [C]// 2017高端铸铁件熔炼和处理技术论坛暨第六届全国等温淬火球铁 (ADI) 技术研讨会, 郑州, 2017: 129-131.
- [9] 孟兆亚. 等温淬火球铁避震器毛坯的生产工艺 [C]// 2017高端铸铁件熔炼和处理技术论坛暨第六届全国等温淬火球铁 (ADI) 技术研讨会, 郑州, 2017: 180-182.
- [10] 巩济民、徐明君. 我国ADI齿轮现状及应注意的问题 [C]// 第九届全国铸铁及熔炼学术会议暨机床铸件技术研讨会论文集, 玉林, 2014: 97-106.
- [11] 郑言彪, 李志华, 张军, 等. ADI 900材料的低温性能研究 [C]// 2017高端铸铁件熔炼和处理技术论坛暨第六届全国等温淬火球铁 (ADI) 技术研讨会, 郑州, 2017: 153-155.
- [12] 周平安. 高性价比抗磨铸铁生产的关键技术和应用 [R]. 铸铁生产技术与质量控制培训班培训讲义, 郑州, 2013: 35-44.
- [13] 曾艺成, 张忠仇, 李克锐. 等温淬火球墨铸铁 (ADI) 生产和技术的新进展 [C]// 第九届全国铸铁及熔炼学术会议暨机床铸件技术研讨会论文集, 玉林, 2014: 22-29.
- [14] 李传斌. 铸铁件生产中值得关注的一项新工艺——铸件凝固后的控制冷却工艺 [J]. 铸造纵横, 2016 (8): 49-53.
- [15] Lekakh S N. High strength ductile iron produced by engineered cooling: process concept [J]. International Journal of Metallcasting, 2015, 9 (2): 21-30.
- [16] Mendez S, U de la Torre, Larranaga P, et al. Processing thickness window for as-cast ausferritic castings [J]. AFS Trans, 123: 219-226.
- [17] Nelson E. Why ADI four applications where ADI is the material of choice and process considerations [C]// Ductile Iron Society 2016 World Conference on ADI, 2016.
- [18] Keough J R. Thin-wall ferrous castings produced from inorganically bonded Sand molds printed at line speed [C]// Ductile Iron Society 2016 World Conference on ADI, 2016.
- [19] 曾艺式. 加强组织协调工作促进ADI产业发展 [C]// 2008年首届等温淬火球铁 (ADI) 产业论坛及研讨会, 北京: 1-6.

(编辑: 刘冬梅, ldm@foundryworld.com)

(选自《铸造》2017年第9期)