

等温淬火球铁（ADI）的发展及应用

张忠仇¹，曾艺成²，李克锐¹

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

摘要：介绍了等温淬火球墨铸铁（ADI）材料的发展概况及 ADI 的金相组织和性能，以及国内外生产应用情况。

关键词：ADI；金相组织；性能；发展；生产应用

1 ADI 发展概况

等温淬火热处理是美国材料学家 E. C. Bain 在 20 世纪 30 年代对钢进行等温转变研究而发展起来的，40 年代 Flinn 教授将其应用于灰铸铁，1952 年美国 International Harvester 公司对球墨铸铁进行大量热处理试验，其中也包括等温淬火热处理，获得了高强度、高韧性又耐磨的球墨铸铁。这一研究开始引起人们关注，但是没有得到正式应用。真正对球墨铸铁等温淬火热处理进行系统研究，并具体应用到齿轮上始于 20 世纪 60 年代末，并在 70 年代末芬兰、美国和中国彼此独立，又几乎同期宣布成功研究 ADI。

美国开发的是高硬度 ADI。1971 年美国通用汽车公司开始进行 ADI 在汽车后桥螺旋伞齿轮上应用的研究，1976 年宣布成功，并在 Pontiacs 轿车后桥上用 ADI 取代锻钢齿轮，建成年产 110 万套 ADI 齿轮的生产线。

芬兰开发的是高韧性 ADI。KymiKymmene 公司于 1974 年成功研究一种称为“KYMENITE”的等温淬火球铁，在 13 个国家申请了专利，用来制造齿轮等承受高应力零件。1978 年开始生产高韧性后桥齿轮、球磨机齿轮等，迄今已生产了几百万套。

中国开发的是高强度、中等硬度 ADI。机械科学研究总院、郑州机械研究所等单位从 1969 年开始研究，采用等温淬火球铁及壳型精铸工艺生产 BJ212、BJ130 汽车后桥螺旋伞齿轮，并于 1975 年先后在北京、厦门建立年产 2 000~5 000 套齿轮的生产车间，供汽车配件需要。由于齿轮不需要加工，解决了当时进口格里森铣床不足，螺旋伞齿轮供不应求的难题。

国外 ADI 的研究开发工作主要集中在 20 世纪 70—80 年代。在此期间，有关 ADI 的化学成分、热处理工艺、组织转变、力学性能和使用性能等基础理论和技术工作已基本完成，ADI 的应用范围也得到确认。一些著名公司如芬兰 HOGFOR 公司、英国的国际密烘公司（MEEHANITE）、瑞士 GF 公司、SULZER 公司、美国 ADVANCED CAST PRODUCTS 公司、通用汽车公司（GM）等都制定了各自的 ADI 商业标准。紧接着各个国家（如英国、美国、德国、日本、

瑞典、芬兰等）开始制定国家标准。1997 年欧洲标准化委员会（CEN）统一了 19 个欧洲成员国的有关标准，发布了 EN 1564 欧洲标准；2005 年国际标准化组织（ISO）发布了 ISO 17804 国际标准。

随着这些标准的发布和实施，标志着 ADI 的生产技术已由试验研究、开发应用阶段进入到工业化生产阶段。

我国与国外相似，20 世纪 70—90 年代的近 20 年时间，对 ADI 的基础冶金学、铸造和热处理生产工艺及控制、动静态力学性能及其影响因素、使用性能及应用范围等进行了大量研究工作，取得很大成绩。但在初期仅限于中、低级别产品和小批生产。现在许多企业，如一汽铸造有限公司、东风汽车公司、河南欧迪艾铸造有限公司、迁西奥帝爱铸造有限公司、大连三明重型车配件制造有限公司、SEW(天津)公司等都已进行 ADI 件的工业化生产。

从 2011 年 8 月在长春召开的第五届全国 ADI 技术研讨会反映出，近年来我国 ADI 的发展有了很大进展。表现在四个方面：①2009 年制定并发布了 GB/T 24733—2009《等温淬火球墨铸铁件》国家标准；②由于优质金属炉料如高纯生铁等有了保证、采用先进工艺装备和技术，球铁毛坯质量有很大改善，为 ADI 的批量生产创造了条件；③专业化热处理中心和 ADI 专业生产厂的建立已初见成效；④部分工程设计人员由于了解 ADI 的优异性能，开始主动选用和设计使用这种材料，预示着我国 ADI 发展将会有重大突破。

2 ADI 的性能

等温淬火球铁显微组织由球状石墨及奥铁体（即高碳，热力学稳定，力学上也稳定的奥氏体加上针状铁素体的混合组织）组成；其每束针状铁素体由许多位相大体相同、厚度约为 200 nm 的铁素体片组成；其高碳稳定奥氏体有两种形态，一种是存在于针状铁素体间的近似于等轴形的块状奥氏体；另一种是存在于针状铁素体内的薄片形奥氏体。从晶粒尺寸数量级来说，针状铁素体厚度约为 200 nm，而铁素体内奥氏体厚度仅为几到十纳米数量级。金属强化的几种主要方式：细晶强化、位错强化、晶界与亚结构强化、第

二相强化、固溶强化以及 TRIP 强化等，都在 ADI 中得到了体现，正是由于 ADI 这种特有的微观组织使其具有了各种优异力学性能。造成高位错密度、多晶粒边界、非常细小针状铁素体和过饱和碳奥氏体组织的主要原因在于球铁区别于钢的高碳、高硅含量及特殊的等温热处理工艺。

ADI 的力学性能见 GB/T 24733—2009《等温淬火球墨铸铁件》国家标准。

经过对 ADI 的理论研究和生产应用实践，总结出 ADI 具有以下独特优点。

(1) 强度高、塑性好

从国家标准所列牌号 QTD 800-10、QTD 900-8、QTD 1050-6、QTD 1200-3、QTD 1400-1 和两个抗磨牌号 QTD HBW400（相当于 QTD 1400-1）、QTD HBW450（相当于 QTD 1600-1）看到：在同等伸长率

情况下，ADI 的抗拉强度是普通球墨铸铁的 2 倍，最高达 1 600 MPa；而在同等抗拉强度情况下，ADI 的伸长率是普通球墨铸铁的 2 倍以上，最大达 10% 以上。ADI 的抗拉强度也优于调质处理的碳素钢，与低合金钢相当（见图 1、表 1）。

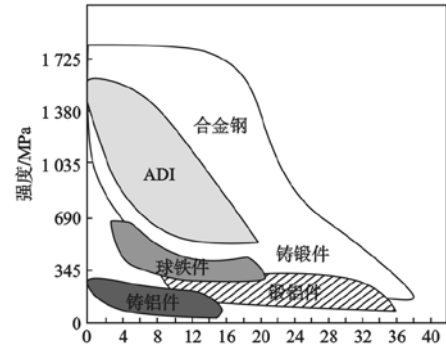


图 1 各种材料性能对比示意图

表 1 几种材质的性能比较

材质	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	硬度 HB	显微组织		性能特点			
					石墨	基体	强度	韧性	耐磨性	
灰铸铁	150~350	-	-	150-280	片状	珠光体	低	特低	低	
普通球铁	铁素体基体	400~500	250~320	7~18	130-230	球状	铁素体	中	高	中
	珠光体基体	600~800	370~480	2~4	190-335	球状	珠光体	高	中	高
铸造碳钢 (ZG)	400~640	200~310	15~25		-	奥氏体+珠光体等	中	特高	中	
轧制碳钢	315~610	195~275	15~30		-	珠光体+马氏体等	中	特高	低	
铸造高锰钢 (ZGMn13)	637~735		20~35	<229	-	奥氏体	高	特高	中	
合金钢 (20CrMnTi)	1 080	835	10	217	-	贝氏体+马氏体等	特高	中	特高	
ADI	1~3 级	850~1 050	550~700	7~12	250-340	球状	较粗的奥铁体	高	高	中
	4~5 级	1 200~1 500	850~1 200	1~4	340-500	球状	较细的奥铁体	特高	中	特高

(2) 质量轻、密度与强度之比 (ρ/R_m) 小

ADI 密度为 7.1 g/cm³，而钢为 7.8 g/cm³，因此同尺寸零件，ADI 要比钢轻约 10%。为了节能、节材和减排，人们希望材料轻而坚固，满足产品轻量化的要求，而选择密度与强度之比小的材料。表 1 列举了一些材料的硬度，可以看出 ADI 的比值≤调质处理低合金钢 20CrMnTi 和高强度铝合金，它是极具有竞争力的材料。

(3) 旋转弯曲疲劳强度和接触疲劳强度高，动载性能好。ADI 的旋转弯曲疲劳强度可达 400~500 MPa，与调质处理低合金钢相当；ADI 的接触疲劳强度可达 1 600~2 100 MPa，比经过氮化处理或渗碳处理的低合金钢高。

(4) 吸震性好

ADI 的弹性模量比钢低，加上金属基体中存在石墨球，能迅速吸收震动并增大噪音阻尼，使机械部件运行更安静、平稳。

(5) 耐磨、抗磨性好

试验表明：硬度为 HRC 45-48 的 ADI 齿轮，其

寿命比具有马氏体组织、硬度为 HRC 58-62 的锻钢齿轮更长；硬度为 HBW 300 的 ADI 的耐磨性比 HBW 500 的锻钢好。对 ADI 材料而言，硬度越高，耐磨性越好。ADI 的耐磨性能比任何同等硬度水平的钢都好，它是挖掘机（推土机）或其他机械高磨损构件使用的理想材料。

此外，根据等温淬火热处理工艺的不同，ADI 的力学性能可以在较大范围内变化，以满足机械零件在不同工况条件下工作。

正是由于 ADI 具有这种奥铁体组织，才使其成为性能优异的材料，被国内外专家誉为 21 世纪最具发展潜力的高科技材料。

3 ADI 的应用

ADI 的发展经历了试验研究、开发应用和产业化三个阶段。由于它的许多优点，发展很快，应用范围不断扩大，产量不断增加。

3.1 国外 ADI 的应用情况

20 世纪 60 年代，美国国际收割机公司在军用车

辆履带板用 ADI 方面的开创性工作，既展示了 ADI 应用的机会，又显示出其工艺的复杂性。60 年代后期，美国通用汽车公司开始开发用 ADI 齿轮代替轿车渗碳淬火钢质准双曲面齿圈和小齿轮差速齿轮副。

1972 年，为解决球铁压缩机曲轴疲劳强度不足的问题，Tecumseh 产品公司开始在其 AE 型密封压缩机上安装了 ADI 曲轴（图 2）。根据考证，该零件是 ADI 最早的商业应用。



图 2 AE 型 Tecumseh 压缩机曲轴

1977 年，在完成大量实验室和车队实际跑车测试后，通用汽车公司开始在密歇根州 Pontiac 汽车厂生产 ADI 后桥螺旋伞齿轮（图 3），替代 AISI 渗碳淬火钢齿轮。通用公司生产了 100 多万套 ADI 齿轮，成本节省超过 20%；同时，GM 又开发了四轮驱动车辆的 ADI 恒速连接器（图 4），通用公司（后来是 Delphi 公司）ADI 恒速连接器的生产持续至今，每天装配量超过 9 000 件。



图 3 ADI 准双曲面盆齿和小锥齿轮



图 4 ADI 恒速连接器

20 世纪 70 年代和 80 年代初期，热处理设备制造商着手开发适合商业等温淬火的更高效率的设备。1983 年，Advanced Cast Products 公司选用半自动盐浴法。1984 年 Getrag 齿轮公司应用可控气氛——热油设备生产 ADI 柴油机正时齿轮（图 5）；同年，美国

大气炉公司（现为 AFC-Holcroft 公司）推出了通用箱式等温淬火炉，该炉使用高活性的亚硝酸盐/硝酸盐控制气氛盐浴淬火（图 6）。



图 5 ADI 柴油机正时齿轮



图 6 AFC-Holcroft 通用箱式等温淬火炉

20 世纪 80 年代，北美 ADI 的应用持续增长。快速增长的推动力是零件制造成本的降低。对于中等批量的球铁件，其单件价格只有钢的一半。加上等温淬火热处理和运输的附加成本，ADI 零件的成本节省仍然达到 20%。同一时期，随着更多的工艺知识、更好的控制、以及改进的热处理设备的广泛应用，一大批相对简单的 ADI 零件应用开始出现。起初应用的是简单耐磨件和耕地零件，如镶铸有钢管的施肥刀（图 7a）、挖掘机斗齿（图 7b）、铁路金属悬挂件（图 7c）、犁头、雪梨履带、耕齿、破碎机件和磨损件等简单、低成本零件，用于替代热处理钢、锰钢、表面堆焊耐磨层的钢铁件以及其组合件。随后，ADI 应用到动力负载零件上，替代铸钢件、锻件和焊接件等。发动机支撑架（图 8a）、悬挂零件（图 8b）、材料输送机零件（图 8c）、齿轮传动器轮毂（图 8d）等。

同期的欧洲则使用等温淬火后能加工的、相对低强度牌号的 ADI 来替代锻钢件和焊接件。该技术是由 Muhlberger 博士开创、意大利维罗那 Zanardi 铸造厂加以发展的。瑞典的 JOT 公司则针对大一些的齿轮和采矿零件试验开发 ADI。与北美的发展相反，大部分欧洲的 ADI 应用是在等温淬火后进行加工。

1992 年，首次开发了含碳化物的 ADI (CADI) 的应用。CADI 可以用好几种方法生产，只是其显微组织中含有奥铁体和碳化物，碳化物的主要作用是增加耐磨性。所开发产品为一种小型犁尖（图 9），其成本低、寿命长，用于替代表面堆焊或锰钢零件。

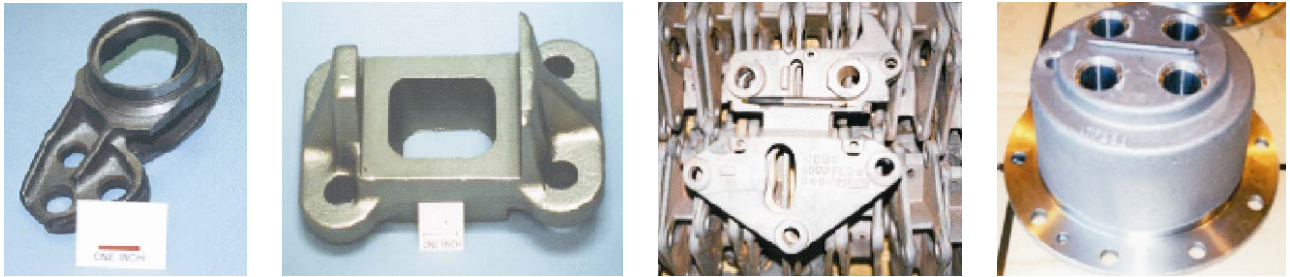


(a) 无水氨（施肥）刀片

(b) 挖掘机斗齿

(c) 铁路悬挂零件

图7 简单耐磨件和耕地零件



(a) 发动机支撑架

(b) 悬挂 U 型螺栓支架

(c) ADI 材料输送机零件

(d) 齿轮传动器轮毂

图8 动力负载零件

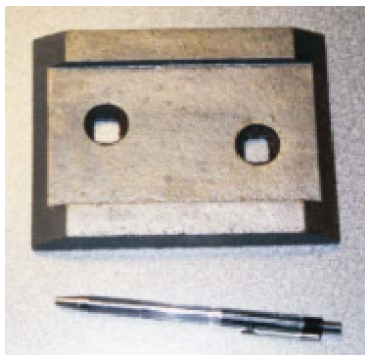


图9 CADI 犁尖

1993 年，美国球铁协会制定了美国军用 ADI 工艺认证标准，该文件概述了采购 ADI 零件时应详细说明的要求。泵零件、链轮、滚轮、重载车悬挂控制臂和转向节开始出现。中型和重载卡车悬挂件大量应用，当时北美 ADI 年产量超过 30 000 t。21 世纪伊始，ADI 的应用正经受一系列决定性的、新的挑战。

轻卡的 ADI 拖钩（图 10）成本低又耐用，且具有较高的抗冲击性能，改进了汽车拖钩的断裂问题。



图10 轻型卡车上的拖钩

悬挂件从代替锻件的加工设计，演变到 ADI 铸件设计（图 11a），再到精致薄壁、既轻又近净形铸造的有限元设计（图 11b）。装在福特 Mustang Cobra 车上有限元设计的 ADI 上控制臂（图 11c）是非常典型的应用。当有限元设计指出，起初想用的厚铝铸件已经不适合车辆组件时，就采用了 ADI。从 ADI 生产的早期开始就受到农业部门的欢迎。最近，农机方面的应用已经从耕地和简单受力件演变到承受动载荷的零件，如刹车片、拖拉机悬臂（图 11d）和动力传输零件等。

3.2 国内 ADI 的应用情况

与国外相似，国内 ADI 也主要应用于工程结构件和高性能高精度要求的动载性能的重要零件及耐磨、抗磨件，分述如下。

3.2.1 工程结构件

多用于汽车、拖拉机、铁路车辆、农用车辆、工程、矿山和农业机械等要求耐磨及一定性能的零件。这类零件一般需要加工，但尺寸精度要求不高，主要性能要求强度、耐磨和抗磨性。这些构件原来材料是锻钢、铸钢或普通球铁、可锻铸铁、铝合金等。例如汽车上的牵引钩支撑座、衬套、控制臂、转动轴轴颈支撑、载重车钢板弹簧支架、发动机固定支架、铁路货车斜楔、销套、垫板、支架、风镐缸体、机头、榨油机的榨螺、小型柴油机曲轴、柴油机凸轮轴、链轮等。这些零件的应用，最能发挥 ADI 高强度、高耐磨性，零件重量与抗拉强度比值低等性能特点，改用后效果明显（图 12）。

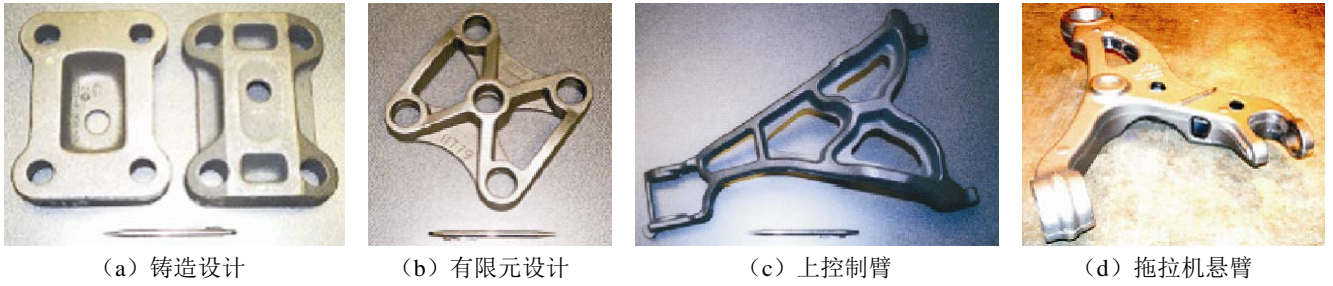


图 11 悬挂件及承受动载荷的零件



图 12 工程结构件

如第一汽车集团公司最早开发 CA141 卡车 ADI 后拖钩——支承座、衬套，用 ADI 代替 ZG270-500 制造 16 t 载重卡车钢板弹簧支架，其 $R_m \geq 1\ 000\ \text{MPa}$ ， $A \geq 10\%$ ，HRC 30-35，支架承载能力为 ZG270-500 的 1 倍以上，同时铸件工艺出品率提高 20% 以上，废品率也大幅下降。最近研发 60 t 自卸车 ADI 前轴（见图 13），重 260 kg，长 2.2 m，取代 42CrMo 合金锻钢，减轻重量 80~100 kg，台架疲劳试验寿命比原合金锻钢设计要求的 16 万次高几倍。此外，一汽正在开发前桥驱动越野车的 ADI 转向节、高机动性中型载重车的 ADI 控制臂、转向节及其他底盘件，预计不久将有 1.5 万吨/年的 ADI 投入产业化生产阶段。



图 13 一汽 60 t 自卸车前轴

东风汽车公司研发的高机动性越野汽车 ADI 底盘悬架系统件，针对 ADI 材料的性能特点，对零件重新进行有限元法结构优化设计。在零件关键受力部位有所增强条件下，对零件壁厚减薄。该底盘悬架系统原设计 ZG45 的 19 个零件采用 ADI 后总重由 630.62 kg 减少到 380.66 kg，减重 249.96 kg，减重率 39.6%。

此外，河南欧迪艾铸造有限公司为包头奔驰重型

卡车公司、陕西汉德车桥公司生产重型卡车底盘 ADI 钢板弹簧支架，为意大利福伊特公司生产大巴车 ADI 控制臂，为上海安投公司生产工程机械 ADI 联轴器。大连三明重型车配件有限公司为一汽生产部分 ADI 钢板弹簧支架。

威墅堰机车车辆工艺研究所研制的 ADI 斜楔 $R_m \geq 1\ 400\ \text{MPa}$ ， $A \geq 1\%$ ，HRC 39-48，比原 ZG230-450 斜楔耐磨性提高 6~10 倍，减重 25%。

3.2.2 高性能、高精度要求动载性能的重要构件

典型零件为高疲劳性多缸柴油机曲轴和高精度、高性能各类齿轮，由于这些零件均为机械重要构件，受力复杂、负荷重、对材质的性能和产品的尺寸精度要求高，且为大批量生产，要求稳定性好，这就对 ADI 构件生产过程中的铸造、热处理、机加工、检测等各方面提出了严格要求。如提供的铸件毛坯是化学成分稳定、球化率高、石墨球数多、分布均匀、基体组织恒定、组织致密、无铸造缺陷的铸件。热处理应保证加工好的齿轮、曲轴在等温淬火处理过程中不氧化、脱碳、变形，并保证同批零件组织和尺寸变化稳定。机加工应提供适合于不同硬度 ADI 的加工刀具和加工工艺，保证加工精度和生产效率。此外，还应有适应大量生产条件下产品质量的检测方法和相应的仪器、设备等。

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,球化 1-2 级,石墨球大小 5-7 级, $R_m \geq 1\ 300\ \text{MPa}$, $A \geq 4\%$, HRC 33-38。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 $R_m \geq 1\ 095\ \text{MPa}$, $A \geq 7.4\%$, HRC31, 齿轮弯曲疲劳强度安全系数可达 3.56 倍。在 AK 型柴油机上进行噪声对比试验,装 ADI 齿轮比装 40Cr 氮化钢齿轮的柴油机整机噪声降低 1.92 dB; 在 AKZ 型机上试验,装 ADI 齿轮比装 38CrMoAl 和 40Cr 氮化钢齿轮的柴油机整机噪声降低 2.56 dB。此外对行星齿轮、半轴齿轮及变速箱齿轮进行试验,均取得很好的效果。

SEW 公司收购了芬兰 Kymi Kymmene 厂,在其产品中,一直坚持用 ADI 齿轮,图 14 为其典型产品。自在中国天津建厂后一直积极研发生产 ADI 产品,2009 年产量 500~600 t,2011 年达 1 000 t 左右。



(a) 齿圈的一扇形段 (b) 与齿圈相配的小齿轮

图 14 SEW 公司典型 ADI 齿轮

曲轴的安全系数更高。某些原为普通球墨铸铁的曲轴,由于不能满足使用要求进而采用 ADI。如南京理工大学与淮海机器厂联合试制,用高韧性 ADI 代替合金钢生产轿车发动机 368Q 三拐曲轴(图 15), $R_m \geq 940\ \text{MPa}$, $A \geq 11.5\%$, $\alpha_k\ 126\ \text{J}/\text{cm}^2$ (无缺口),台架试验安全系数为 1.7,高于低合金锻钢曲轴的 1.6,3 万 km 道路试验主轴和连杆轴颈磨损仅分别为 0.003 7 mm 和 0.004 4 mm,远低于 NJ24—1986 标准规定的 0.025 mm 的要求。498 型和 6110 型柴油机,采用增压器提高其爆发压力后,要求曲轴的弯曲疲劳强度在 420 MPa 以上,大连柴油机厂、滨州海得曲轴有限公司和朝阳柴油机厂联合试制高韧性 ADI 曲轴,配合圆角滚压强化工艺,使 498 型和 6110 型柴油发动机曲轴的安全系数分别达到 2 及 1.8 以上。

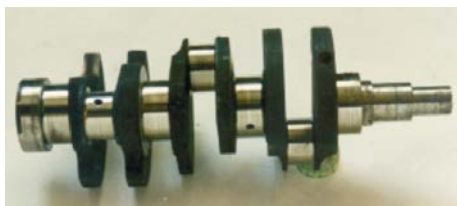


图 15 奥拓轿车 ADI 368Q 曲轴

ADI 曲轴具有高的经济效益,以 6110 型增压发动机曲轴为例,零件减重 6%,毛坯减重 10.2%,价

格约为 42CrMo 锻钢曲轴的 50%。386Q ADI 曲轴成本与进口锻钢和国产 40Cr 锻钢曲轴之比约 1:2.7:1.84。

江苏万力机械股份有限公司、辽宁北方曲轴有限公司、扬州柴油机厂等单位也正积极研发多缸柴油机 ADI 曲轴。近年来,随着增压技术在汽油发动机上的开始应用,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经完成,现正进行台架试验。它有望成为我国首批正式批量生产 ADI 曲轴的工厂。

3.2.3 耐磨、抗磨件

多用于矿山、建筑、电力、农业等机械上的抗磨零件,如磨球、衬板、锤头、锤片等。主要利用 ADI 高硬度、高抗磨性和一定韧度。这些产品对球铁坯件质量(表面粗糙度、尺寸精度、成分波动范围、基体组织等)和热处理后工件性能状况要求不严,大部分不需要机加工。为了降低成本,增强竞争力,多采用相对简单、成本较低的生产工艺和设备,目前这些产品在我国 ADI 产量中占一定比例。

ADI 有好的抗磨、耐磨性能,又有较好的韧性,而含碳化物的 CADI 有更高的硬度(HRC>56)和抗磨性能,在冶金矿山、煤矿机械、工程机械、农业机械等抗磨、耐磨构件领域中有很好的应用前景。目前,国内许多厂家都在开展这方面的试验工作,如输煤机刮板、CADI 磨球、磨煤机底板、农机犁铧等。欧洲 ADI 市场中,矿山、工程占 22%,是仅次于汽车工业的大用户。河北迁西奥帝爱机械铸造有限公司开发的含碳化物 10%左右的矿用球磨机 CADI 磨球,经一年多的使用试验,效果明显,使用寿命比原用材料(低铬合金铸铁)提高约一倍,磨球无失圆、破碎现象,且可使球磨机节电约 20%,生产效率提高约 20%。承德求业钒钛抗磨科技材料有限公司利用钒钛 C、N 化合物等硬质点生产的 CADI 磨球也取得同样效果。迁西奥帝爱机械铸造有限公司还用高牌号(QTD 140-1 以上)ADI 代替高锰钢生产球磨机衬板,取得了意想不到的效果。北京菲美特机械有限公司用 1600-1 牌号的 ADI 代替 QT 800-2 生产生物燃料压块机模具,在苏州 A.P. 公司进行热处理,稳定达到 1600-3,最高 1700-2,取得较好的使用效果,已小批量投产。

4 结束语

ADI 的奥铁体微观组织决定了它具有优异的综合性能,从而使得这种材料在许多重要工程领域有越来越多的应用。大力发展 ADI,将会促进中国从一个铸造大国向铸造强国迈进的进程。