

A

USTEMPERED

等温淬火球墨铸铁的 生产及应用实例

D

UCTILE

I

RON

邓宏运 王春景 章舟 编



化学工业出版社



www.cip.com.cn

读科技图书 上化工社网

A

USTEMPERED

本书紧密结合各类等温淬火球墨铸铁（ADI）铸件的生产实际，在介绍ADI技术生产特点及应用情况的基础上，重点介绍了高性能ADI铸件的性能和组织特点、热处理及合金化工艺，ADI相关设备，列举典型生产实例介绍了齿轮、曲轴等ADI铸件的生产要点和注意事项。

全书内容突出实用性，希望对从事ADI行业的技术人员、一线工人，以及铸造专业院校的师生有所帮助。

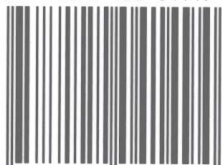
D

UCTILE

I

RON

ISBN 978-7-122-04149-4



9 787122 041494 >

销售分类建议：机械/铸造

定价：28.00元

A

USTEMPERED

等温淬火球墨铸铁的 生产及应用实例

邓宏运 王春景 章舟 编

D

UCTILE

I

RON



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

等温淬火球墨铸铁的生产及应用实例/邓宏运, 王春景, 章舟编. —北京: 化学工业出版社, 2009.1
ISBN 978-7-122-04149-4

I. 等… II. ①邓…②王…③章… III. 等温淬火-球墨铸铁-生产工艺 IV. TG143.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 182570 号

责任编辑: 刘丽宏

装帧设计: 杨 北

责任校对: 洪雅姝

出版发行: 化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京市振南印刷有限责任公司

装 订: 三河市宇新装订厂

850mm×1168mm 1/32 印张 8 $\frac{3}{4}$ 字数 231 千字

2009 年 4 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 28.00 元

版权所有 违者必究

前言

等温淬火球墨铸铁（简称 ADI）是近 30 多年发展起来的新一代球墨铸铁材料，被誉为材料领域新科技的产物，用其生产的铸件具有强度高、韧性好、综合性能优良，密度与抗拉强度的比值低，弯曲疲劳和接触疲劳强度高，吸震性和降噪性能好，抗磨损、低温性能好以及生产成本低，经济效益好等公认的许多独特优点，已经成为 21 世纪人们关注的热点材料之一。

从 20 世纪 70 年代初到 90 年代的 20 多年时间里，科技人员对 ADI 的基础冶金学、铸造和热处理工艺及控制、动静态力学性能及影响因素、使用性能和应用范围等做了大量研究工作，工业发达国家还制定了相应的标准来指导生产。我国郑州机械研究所、机械科学研究总院、中国第一汽车集团公司、东风汽车公司、一拖集团公司、山东省科学院、清华大学、山东大学、西安理工大学、西安工业大学以及成都科技大学等单位对 ADI 齿轮进行了大量、深入的研究与开发工作，内容涉及韧型、强型、硬型三类 ADI 材料，取得了丰硕的研究成果和大量试验数据。在此基础上，生产、应用了一批包括汽车后桥圆锥齿轮、车用柴油机正时齿轮、拖拉机末端传动齿轮和工程机械齿轮等多种部件。可以说，ADI 在齿轮技术上的研究与开发获得了不小的成功。实践表明，ADI 用作齿轮材料，是很合适的。除了应用于齿轮外，研究者对于 ADI 在发动机曲轴，拖拉机、铁路构件，农机部件及重型卡车零件等方面的应用也取得了很大进展。研究和应用均证明，ADI 是一种值得大力推广的优良工程材料。

本书从生产实践角度重点介绍了 ADI 技术的生产及应用情况：ADI 生产技术特点，高性能 ADI 铸件生产、应用实例，ADI 相关设备，内容突出实用性，希望对从事 ADI 行业的技术人员、一线

工人以及铸造专业院校的师生有所帮助。

本书在撰写过程中得到了孙国雄、张忠仇、曾艺成、刘金城、李言成、袁亚娟、魏兵、时胜利等专家的大力支持，西安机电研究所颜文非所长提供了中频炉设备详细资料，南京光英工业炉研究所吴光英所长撰写了 ADI 电炉热处理设备内容，沈阳恒丰实业有限公司孟昌辉撰写了感应电炉成型炉衬的应用，铸造技术杂志李晓霞编辑对全书文字及图表进行了计算机标准化处理，在此表示衷心的感谢。

鉴于编者水平有限，不当之处敬请读者批评指正。

编者

目 录

绪论	1
----	---

第 1 章 等温淬火球铁及其性能

1.1 贝氏体相变与等温淬火球铁	8
1.1.1 贝氏体相变	8
1.1.2 等温淬火球铁相变过程	13
1.2 ADI 的机械加工性能	18
1.2.1 ADI 的微观组织特点	19
1.2.2 ADI 的机械加工性能特点	20
1.2.3 ADI 的加工刀具和加工参数	25
1.2.4 提高 ADI 加工性能的措施	30
1.3 ADI 的疲劳强度	31
1.4 ADI 的冲击韧度和断裂韧度	40
1.4.1 ADI 的冲击韧度	40
1.4.2 ADI 的断裂韧度	44
1.5 ADI 的耐磨性	50
1.5.1 ADI 的摩擦磨损试验结果	50
1.5.2 ADI 在齿轮、衬套、链轮上的运用	51
1.5.3 ADI 在车轮、制动件上的运用	54
1.5.4 ADI 在磨料磨损条件下的应用	55
1.5.5 ADI 在特殊磨损条件下的应用	56
1.6 ADI 的微观组织与力学性能	56
1.6.1 ADI 的热处理工艺	56
1.6.2 ADI 的金相组织分析	58

1.6.3 ADI 微观组织分析	59
1.6.4 ADI 的力学性能	61
1.6.5 保证或提高 ADI 性能的措施	63
1.6.6 结论	65
1.7 等温淬火温度对 ADI 中残余奥氏体及其力学性能的影响	66
1.7.1 试验方法	66
1.7.2 试验结果	68
1.8 等温淬火对球墨可锻铸铁力学性能的影响	73
1.8.1 试验过程与方法	74
1.8.2 试验结果与讨论	75
1.9 高韧性等温淬火球铁的力学性能	80
1.9.1 获得高韧性 ADI 等温淬火球铁件的技术条件	80
1.9.2 高韧性 ADI 的生产实例	81
1.10 奥贝球铁中白亮区的形成及影响因素	84
1.10.1 试验方法	84
1.10.2 试验结果及分析	85

第 2 章 ADI 的化学成分及等温淬火工艺

2.1 等温淬火球铁基本化学成分	90
2.2 等温淬火球铁合金元素控制	91
2.2.1 上贝氏体球墨铸铁	91
2.2.2 下贝氏体球墨铸铁	92
2.3 锰铜合金化贝氏体低碳 ADI	93
2.3.1 试验方法	94
2.3.2 试验结果	95
2.4 硅锰合金化奥贝球铁的热处理工艺	97
2.4.1 实验条件和方法	97

2.4.2	实验结果	98
2.5	ADI 的等温淬火工艺原则	101
2.5.1	奥氏体等温转变原理	102
2.5.2	上贝氏体等温淬火	105
2.5.3	下贝氏体等温淬火	105
2.5.4	等温淬火热处理工艺的制定	106
2.5.5	等温淬火设备与方法	107
2.6	循环热处理和合金化对 ADI 性能的影响	107
2.6.1	成分设计	108
2.6.2	试样制备	108
2.6.3	热处理试验	109
2.6.4	试验结果及分析	109
2.7	连续冷却贝氏体球铁成分和工艺	111
2.7.1	试验条件及化学成分选择	111
2.7.2	试验结果及分析	112
2.7.3	生产验证	117

第 3 章 ADI 熔炼用中频感应电炉

3.1	ADI 中频感应电炉的工作原理及组成	118
3.1.1	中频感应炉的工作原理	118
3.1.2	中频感应炉的组成	120
3.1.3	感应电炉炉衬砌筑	126
3.2	感应电炉成型炉衬的应用	133
3.2.1	成型炉衬的材料	134
3.2.2	成型炉衬的工艺流程	137
3.2.3	成型炉衬的安装形状与结构	137
3.2.4	成型炉衬的安装及使用	139
3.3	中频感应电炉的试炉及熔炼操作注意的问题	141

3.3.1	中频感应电炉炉衬的烧结及烘烤	141
3.3.2	中频感应电炉熔炼操作注意的问题	142
3.4	中频感应电炉的维护保养与安全操作及事故处理	144
3.4.1	中频感应电炉的维护保养	144
3.4.2	中频感应电炉安全操作要领	145
3.4.3	中频感应电炉事故处理方法	145
3.5	中频感应熔炼炉启动时 6 种故障分析及处理	148
3.6	中频感应熔炼炉运行中 14 种故障处理	151
3.7	电容器运行中应注意的问题	157

第 4 章 ADI 球铁原件的制作

4.1	原材料技术要求及配料过程控制	160
4.1.1	原材料的控制	160
4.1.2	ADI 球铁原件铁液化学成分选择	162
4.1.3	ADI 球铁原件生产技术要求	162
4.2	球化剂的选用原则与球化工艺	162
4.2.1	球化剂的类型	163
4.2.2	球化剂的选用原则及应用	164
4.2.3	常用球化工艺—冲入法	165
4.3	孕育剂的选用及孕育工艺	166
4.3.1	孕育剂的选用	167
4.3.2	常用孕育工艺	167
4.3.3	孕育衰退现象及衰退理论	168
4.3.4	提高孕育效果的技术措施	169
4.4	ADI 球铁原件原铁液熔炼与球化孕育处理	169
4.4.1	ADI 球铁原件原铁液熔炼工艺	169
4.4.2	ADI 原件的球化处理及孕育处理工艺	172
4.4.3	ADI 原件的铸造工艺及浇注工艺	173

4.4.4	ADI 原件常规生产中容易忽视的问题	173
4.5	熔炼测温及取试样与球化处理后球化率检测技术	173
4.6	ADI 球铁原件常见缺陷的分析与对策	176
4.6.1	ADI 球铁原件缩孔缩松	176
4.6.2	ADI 球铁原件的夹渣	177
4.6.3	ADI 球铁原件石墨漂浮	179
4.6.4	ADI 球铁原件皮下气孔	180
4.6.5	ADI 球铁原件球化衰退及球化不良	182

第 5 章 ADI 生产线

5.1	“两步法”制备 ADI	184
5.1.1	试验方法	185
5.1.2	试验结果与分析	186
5.2	悬挂式 ADI 曲轴等温淬火生产线	190
5.2.1	ADI 曲轴生产工艺流程	190
5.2.2	悬挂式 ADI 曲轴等温淬火生产线	191
5.2.3	悬挂式与箱式 ADI 等温淬火生产线的比较	195
5.3	奥贝球铁等温淬火连续生产线	198
5.3.1	等温淬火连续生产线（机组）	198
5.3.2	ADI 连续生产线（机组）	199

第 6 章 ADI 生产应用实例

6.1	奥贝球铁磨球消失模铸造生产	201
6.2	奥贝球铁斜楔消失模铸造生产	208
6.2.1	斜楔材质标准	209
6.2.2	斜楔的热处理——等温淬火	211
6.3	贝氏体合金球铁衬板的生产与应用	213
6.3.1	衬板服役工况	213

6.3.2	生产实验	215
6.3.3	应用与效益	217
6.4	风镐缸体 (ADI) 铸件的生产	218
6.4.1	熔炼及浇注	218
6.4.2	造型	219
6.4.3	热处理工艺	219
6.5	奥贝球铁辊环成分与组织	221
6.5.1	试验方法	222
6.5.2	试验结果	224
6.5.3	分析	225
6.6	奥贝球铁齿轮批量生产等温淬火热处理工艺	229
6.6.1	试验方法	229
6.6.2	试验结果	230
6.6.3	生产应用试验	231
6.7	增压柴油机 ADI 曲轴的开发与应用	233
6.7.1	增压柴油机对曲轴材料疲劳强度的要求	233
6.7.2	应用 ADI 制造增压柴油机曲轴的可行性	233
6.7.3	ADI 曲轴的经济效益与市场	236
6.7.4	六缸增压柴油机曲轴的研制	237
6.8	球铁凸轮轴等温淬火裂纹产生原因及防止措施	240
6.8.1	裂纹情况分析	240
6.8.2	裂纹形成的原因	242
6.8.3	改进措施	243
6.9	等温淬火球铁后板簧支架铸造及热处理	244
6.9.1	ADI 后板簧支架的等温淬火处理	244
6.9.2	板簧支架的热处理工艺	247
6.9.3	等温淬火球铁的组织特征	248
6.10	水平连铸 ADI 球铁在工程上的运用	249

6.10.1	铸铁水平连续铸造简介	249
6.10.2	水平连铸 ADI 球铁型材的应用	250
6.10.3	连铸球铁型材等温淬火的机加工性能	252
6.10.4	连铸球铁型材等温淬火的优势	252
6.11	球墨铸铁等温淬火工艺的生产应用	253
6.11.1	影响球墨铸铁凸轮轴等温淬火工艺的因素	253
6.11.2	球墨铸铁曲轴的强化方式	254
6.11.3	矿山机械类磨损件等温淬火工艺	256
6.12	等温淬火球墨可锻铸铁 (AMI)	256
6.12.1	生产工艺	257
6.12.2	组织与性能特点	259
6.13	CADI 在农机犁铧上的应用	261
6.13.1	犁铧材料的耐磨性及其服役条件	261
6.13.2	CADI 犁铧的试制	262
参考文献		265

绪 论

20 世纪 30 年代初, E. S. Davenport 和 E. C. Bain 在研究钢的冷却速度与性能的关系时, 发现钢在奥氏体化处理后并经一定温度保持, 得到针状铁素体和一定界面上沉淀的碳化物共析组织, 具有良好的综合性能, 这种组织后来被称为贝氏体。在较低温度保持, 形成针状铁素体和铁素体内部一定晶面上沉淀的碳化物的混合物称下贝氏体; 在较高温度保持, 形成板条状铁素体和板条周围沉淀的碳化物的混合组织称为上贝氏体。按现在对贝氏体的分类还有其他各类的贝氏体, 这种热处理工艺称为等温淬火。一定成分的球墨铸铁经等温淬火后得到的铸铁材料, 就是等温淬火球墨铸铁 (ADI)。目前, ADI 已经成为 21 世纪人们选用的热点材料之一, 是一种在球墨铸铁的运用基础上发展起来的值得大力推广的优良工程材料。

一、ADI 的性能特点

(1) 成本低 ADI 价格比锻钢、铸钢、铸铝要低, 如果以屈服强度的成本计算, ADI 是最便宜的材料。

(2) 密度比钢小 ADI 由于在其组织中有近 10 % 左右的石墨, 故同一体积的零件比铸锻钢件大约要轻 10 %。

(3) 综合性能优良 强度与伸长率都很高, 具有优良的动态力学性能, 比锻钢、铸钢以及微合金钢要好很多, 在数百万次交变载荷作用后抗疲劳性仍保持不变。因为 ADI 的缺口敏感性 (敏感系数 2.2~2.4) 小, 这是提高的有利因素。

(4) 减音性能好 ADI 中的石墨具有很强的吸音能力, 故 ADI 零件工作时噪声小, 这种特性对汽车与各种其他运转的机器十分有利。

(5) 吸震性好 ADI 弹性模量 ($E=1700\text{MPa}$) 比钢的弹性模量 ($E=2100\text{MPa}$) 低 20 %, 所以吸震性好, 组织中有石墨球, 能快速吸收震动, 使机件运转平稳。

(6) 好的抗摩擦磨损性能 因 ADI 中存在有石墨球, 能降低摩擦系数和运转温度, ADI 零件在表面应力作用下, 奥氏体中的高碳奥氏体有一部分转变为微晶或微晶马氏体, 提高了表面层硬度, 改善抗磨性, 而新的次表面又不断发生以上过程, 因此与同样硬度的钢比较, 它的中晚期寿命更高。

(7) 通过热处理即能获得球墨铸铁等温淬火 ADI 在一般球墨铸铁的基础上 (指化学成分、熔炼方法、浇注处理、铸造工艺等), 增加了一个二阶段等温热处理工序后就可生产出 ADI。热处理给它带来力学性能高的优点, 同时又保留了原有铸造工艺的好处, 如可制造复杂形状的零件, 可对材料进行回用, 生产成本低, 可批量生产等, 在很多场合, 可取代钢或铝的零件。其优点有:

- ① 减轻机器重量;
- ② 减少燃料、动力消耗;
- ③ 提高机器效率;
- ④ 改善环境污染;
- ⑤ 节约成本开支, 提高经济效益。

(8) 铸造工艺多样 除球墨铸铁件常用的黏土砂、树脂砂、水玻璃砂等造型外, 为适合铸件需要, 也有采用了消失模铸造工艺、V 法铸造工艺等, 使 ADI 铸件的发展如虎添翼, 也有根据球墨铸铁的凝固特性采用金属型铸造和金属型覆砂铸造。总之, 生产 ADI 其铸造制型的工艺是多种多样的, 据其铸件的特性要产生的需要而决定。少数特殊要求 ADI 管件、套件, 还有的采用离心铸造。

二、ADI 材料分类

(1) 普通抗磨件 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、高抗磨性和一定的韧性。

(2) 机械承载构件 多用于汽车、拖拉机、铁路车辆、农用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, 但是尺寸精度要求不太高, 性能主要要求高强度的同时兼具一定韧性以及

良好的耐磨和抗磨性。

(3) 高性能、高精度要求的重要构件 典型零件为高疲劳性能的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的重要构件, 受力复杂、负载重, 对材料性能和产品尺寸精度要求高, 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的要求。

三、ADI 生产工艺流程

ADI 工艺流程: 球墨铸铁原件→预热→奥氏体化→等温淬火→清洗→机加工→承办。

四、化学成分对性能的影响

生产优质球墨铸铁对毛坯铸件的质量要求也适用于 ADI 原件, 如石墨球化好, 组织致密、健全、均匀、无缩松、夹渣和气孔等铸造缺陷。要求球化 1~2 级, 球化率 $\geq 85\%$, 石墨球数 ≥ 100 个/ mm^2 , 对重要铸件球化率应 $\geq 90\%$, 石墨球数 ≥ 20 个/ mm^2 。

化学成分对 ADI 性能的影响具体如下。

(1) 碳 C 碳促进石墨化, 提高 Mg 的吸收率, 利于球化, 生产多而细的石墨球, 热处理时, 碳具有稳定奥氏体、阻碍贝氏体转变作用, 并改变上贝氏体的下限温度, 能获得较多的残余奥氏体量及 $\omega(\text{C})$ 量。除了对强度和韧性的影响外, 还影响着铸件的加工硬化程度、抗应变马氏体转变能力以及低温组织的稳定性。 $\omega(\text{C})$ 高, 除可阻碍渗碳体的析出外还可形成更多的细小石墨球, 而提高 ADI 铸件的减摩抗磨及减震性能, 故在防止石墨漂浮的条件下, 应尽量提高 $\omega(\text{C})$ 。

(2) 硅 Si 可以增加基体铁素体含量, 能固溶于铁素体, 强烈促进石墨化, 细化石墨球和增加石墨球数, 并抑制碳化物的形成, 使 ADI 的性能随着 $\omega(\text{Si})$ 量的提高而提高, 特别是当 $\omega(\text{Si})$ 量比较低时更显著; 随着 $\omega(\text{Si})$ 量的增加, 抗拉强度、伸长率和冲击韧度都显著增加, 但当 $\omega(\text{Si}) \geq 3.4\%$ 时则使室温冲击韧度下降。硅对于拓宽 ADI 的热处理工艺具有明显的作用, 较高的 $\omega(\text{Si})$

量可以抑制贝氏体转变中碳化物的析出,使其周围的奥氏体富 C。提高奥氏体的稳定性,增加其数量,从而改善材料的塑性和韧性。 $\omega(\text{Si})$ 量的增加,提高了奥氏体化温度,增加低温脆性,反而降低韧性,同时要注意与 $\omega(\text{C})$ 的匹配,控制 CE 范围。

(3) 锰 Mn 强烈阻碍石墨化,恰与 Si 相反,它能促进碳化物沿晶界析出,降低伸长率和冲击韧度,因此锰量应低些为好。但 Mn 能稳定奥氏体,降低贝氏体(或针状铁素体)转变温度,提高铸件淬透性。因 Mn 扩大奥氏体区,降低过冷奥氏体分解,使奥氏体稳定,对较大截面铸件有利。但 Mn 延缓第一阶段转变的结束,缩小了热处理工艺带,且易偏析到共晶团周界,在最后凝固区聚集,导致碳化物析出。此外由于转变动力学的改变,也增加了白亮区(残余奥氏体+马氏体)范围,使 ADI 塑性降低、强度减弱。因此在满足性能要求的条件下,控制 $\omega(\text{Mn})$ 尽可能低为宜,尤其是对塑性韧性和强度要求高的 ADI 铸件,但对一些高强度牌号的 ADI 铸件,为提高淬透性,可以选择较高 $\omega(\text{Mn})$ 量(0.5%~0.8%)以代替部分合金而降低成本。

(4) 磷 P 熔点低,最后凝固,也会沿晶界析出 P 共晶,其基体组织硬而脆,是球铁中的有害元素,它提高韧性-脆性转变温度,降低伸长率,晶界的磷共晶使球铁的力学性能下降,特别是韧性塑性,尤其对要求低温性能的球铁危害更大,P 高是低温冲击韧度下降的主要原因,应严格限制 $\omega(\text{P})$ 量。

(5) 硫 S 是反球化元素,在铁素体中的溶解度很小, $\omega(\text{S})$ 量过高时,产生低熔点 FeS,分布在晶界上,降低强度和韧性。 $\omega(\text{S})$ 高会增加球化剂 Mg 的消耗,影响球化效果;它能与稀土(RE)作用,影响效果。因而 $\omega(\text{S})$ 量要严格控制。

(6) 镁 Mg 和混合稀土 RE Mg 与 RE 是主要的球化元素,Mg 加入使铁液先脱硫、脱氧,然后才起球化石墨化的作用,其他球化元素如混合稀土中的铈、镧等仅起代替球化元素镁和中和某些干扰元素的作用,RE 残留量高,白口倾向加大,球铁中易产生碳化物。因此要控制镁和其他球化元素的残留量,其和不得超过