

# 水-空交替等温淬火 CADI 磨球的工业实践及应用

陈灿光<sup>1</sup>, 姚永茂<sup>1</sup>, 陈全心<sup>1</sup>, 桂劲松<sup>1</sup>, 方剑锋<sup>1</sup>, 王永喆<sup>2</sup>, 涂小慧<sup>2</sup>, 李 卫<sup>2</sup>

(1. 宁国市华丰耐磨材料有限公司, 安徽 宁国 242300; 2. 暨南大学先进耐蚀蚀及功能材料研究院, 广东广州 510632)

**摘要:** CADI磨球是一种在采矿、建材等行业中广泛应用的研磨介质, 目前行业内常使用油淬+空气中等温处理或盐浴等温处理的工艺调控组织、改善性能, 但这些工艺存在环境污染、损害健康、安全隐患、能源浪费等问题。通过特定设备及工艺手段精准控制降温过程, 采用水-空交替等温淬火的方法处理CADI磨球, 能够达到与油淬/盐浴等温淬火相同的热处理效果。利用该工艺批量生产的CADI磨球具有良好的一致性, 金相组织及力学性能指标符合标准要求, 并在实际应用中取得了良好效果。

**关键词:** CADI磨球; 水-空交替等温淬火; 热处理

等温淬火球墨铸铁 (Austempered Ductile Iron, ADI) 组织由奥铁体和石墨组成, 其中奥铁体是针状铁素体和富碳奥氏体的机械混合物, 该组织因奥氏体中的C含量较高, 其硬度明显高于普通奥氏体, 因此ADI具有优良的综合性能<sup>[1]</sup>。CADI磨球 (Carbide Austempered Ductile Iron Grinding Balls) 又称作含碳化物等温淬火球墨铸铁磨球, 是近些年由ADI发展而来的一种以奥铁体+碳化物为主要基体的强度高、塑韧性好的铸造合金磨球, 具有如下特点。

(1) 耐磨性好。CADI磨球耐磨性好, 主要原因有3点: 一是初始硬度高, 对于较小规格 ( $\Phi \leq 60$  mm) CADI磨球, 初始硬度要求HRC $\geq 56$ ; 二是逐层硬化, CADI磨球在实际应用中, 随着球磨机的转动, 在外力作用下, 磨球表层在发生塑性变形时, 会诱发高碳奥氏体向马氏体转变, 这显著增加了CADI磨球表层硬度, 更耐磨; 三是碳化物加持, CADI磨球基体中含有10%以上的碳化物组织, 可有效提高其耐磨性。

(2) 不易破碎、失圆。CADI磨球不易破碎、失圆, 主要原因有3点: 一是磨球本身的韧性较好; 二是磨球基体内均匀分布着大量的球状石墨, 在冲击时, 可有效对冲冲击力进行分解, 降低破碎风险; 三是CADI铸铁材料抗压强度高, 变形倾向小, 不易被砸变形、失圆。

(3) 节能节电。CADI磨球密度较低, 在相同装载量的前提下, 重量较轻, 可有效降低球磨机的运转功率, 从而达到节能、节电的目的。

现在行业内较常使用的热处理工艺有油淬+空气中等温处理和盐浴等温处理, 经此两种热处理工艺处理的CADI磨球性能稳定, 硬韧性匹配较好, 铸球的硬度和冲击韧性相近<sup>[2]</sup>, 都可满足生产需要。但生产过程中也存在一些问题, 如盐浴等温处理工艺生产线投资大、成本高, 盐蒸气污染环境、损坏机械设备、危害员工健康; 油淬+空气中等温处理工艺存在易燃危险, 油烟危害环境、损害员工身体健康等问题。因此, 需要开发绿色、节能、环保的热处理工艺, 改善工作环境, 降低对人和设备的损害。

## 1 CADI磨球水-空等温淬火的研发及设计思路

水-空交替等温淬火是以水和空气为淬火冷却介质, 采用特定的设备及工艺措

### 作者简介:

陈灿光 (1986-), 男, 工程师, 研究方向为耐磨材料的生产与应用。电话: 15345635221, E-mail: 79352470@qq.com

### 通讯作者:

王永喆, 男, 博士, 电话: 17727660357, E-mail: hitwangyz@163.com

中图分类号: TG143.5  
文献标识码: B  
文章编号: 1001-4977(2022)08-1017-04

### 收稿日期:

2021-12-01 收到初稿,  
2022-01-10 收到修订稿。

施,使磨球奥氏体化后以特定的冷却速度在水和空气中交替淬火冷却至一定温度后,进入空气炉等温一定时间以获得奥氏体组织的热处理工艺。宁国市华丰耐磨材料有限公司自2019年开始,与暨南大学共同开展了多循环水-空交替等温淬火实验,取得了一系列成果。实现了经过水-空交替等温淬火处理后的大直径CADI磨球,其组织和性能都达到了盐浴和油淬等温处理的效果;得到了水-空交替等温淬火工艺有望在大直径CADI磨球生产中替代盐浴和油淬等温淬火工艺<sup>[3]</sup>的结论。其中直径150 mm的CADI磨球(CADI-150)经水-空交替等温淬火处理后的具体数据见表1。

表1 CADI-150磨球水-空交替等温淬火实验数据  
Table 1 The experimental results of the CADI-150 grinding balls by water and air alternating isothermal quenching heat treatment

工艺方法	硬度 HRC				冲击吸收能量/J	
	表面硬度	1/2R硬度	心部硬度	硬度差	心部	1/2R
油淬	55.72	53.97	51.95	3.77	12.28	14.8
盐浴	54.92	54.07	52.37	2.55	11.97	13.77
水-空交替淬火	55.73	53	53.73	2	12.7	13.77

水-空交替淬火工业化难点在于精确控制磨球水淬的终止温度,有效控制针状铁素体中马氏体和贝氏体组织的占比。为将实验室成果进行工业化实现,公司新建一条水-空交替等温淬火热处理线,该热处理线采用两条连续推杆式加热炉实现磨球的奥氏体化及后期等温处理,采用可动摇篮循环浸水的方式实现磨球多次循环水-空交替淬火,采用PLC参数控制的方式实现过程的自动化,采用红外连续测温实现温度参数的采集与控制。CADI-50和CADI-60是小规格CADI磨球,要求具有较高的硬度及一定的韧性。经过多次试验研究入水时间对小尺寸磨球(CADI-50和CADI-60)温度的影响规律,实现了对CADI-50和CADI-60出水入水温度的精确控制,如表2所示。第一次水淬的终止温度可以精确控制在 $(350 \pm 20)^\circ\text{C}$ 的范围,随后风冷90 s,可使磨球内外的温度趋于一致。通过第二次水淬和空冷均温,可使磨球终止温度控制在 $(200 \pm 10)^\circ\text{C}$ ,这样就可有效控制基体组织,使其具备优良的硬韧性。

表2 CADI-50及CADI-60磨球热处理工艺  
Table 2 Heat treatment process of the CADI-50 and CADI-60 grinding balls

一次水淬终	一次空冷	二次水淬终	二次空冷	水温	等温
止温度/ $^\circ\text{C}$	均温时间/s	止温度/ $^\circ\text{C}$	均温时间/s	/ $^\circ\text{C}$	处理
$350 \pm 20$	90	$200 \pm 10$	120	40~45	$200^\circ\text{C} \times 5\text{h}$

该设备为水-空交替等温淬火的工业化实现提供了有力保障,如图1所示。目前采用该生产线已实现水-空



图1 水-空交替等温淬火生产线

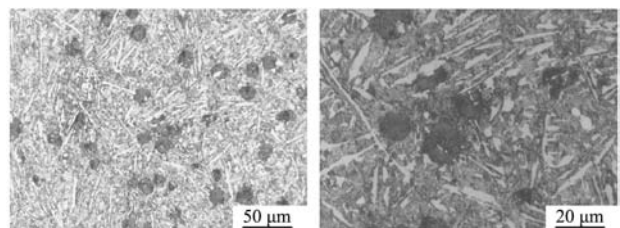
Fig. 1 Production line of the water and air alternating isothermal quenching heat treatment

交替等温淬火 $\Phi 50\text{ mm}$ (CADI-50)和 $\Phi 60\text{ mm}$ (CADI-60)两种CADI磨球的批量生产,并在山西太钢某选矿厂进行试用,取得了良好的使用效果。

## 2 水-空交替等温淬火CADI磨球的组织与性能

### 2.1 水-空交替等温淬火CADI磨球的微观组织

图2和图3分别为水-空交替等温淬火后CADI-50磨球表层和心部的微观组织,可以看出,无论是磨球表层还是中心,组织分布均匀,由针状铁素体+富碳奥氏体+碳化物+球状石墨组成。因磨球表层冷却速率快于心部,所以磨球表层碳化物尺寸略小,含量略高,约18%~25%;磨球心部碳化物尺寸较大,含量略低,约12%~17%。

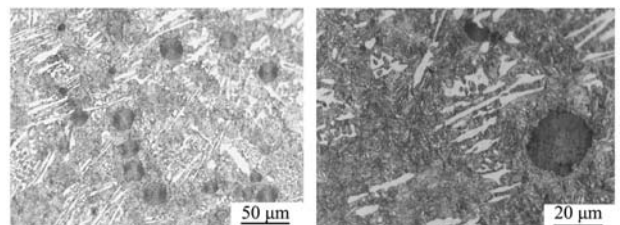


(a) 低倍

(b) 高倍

图2 水-空交替等温淬火CADI-50磨球表层微观组织

Fig. 2 The microstructures on the surface of the CADI-50 ball treated by the water and air alternating isothermal quenching heat treatment



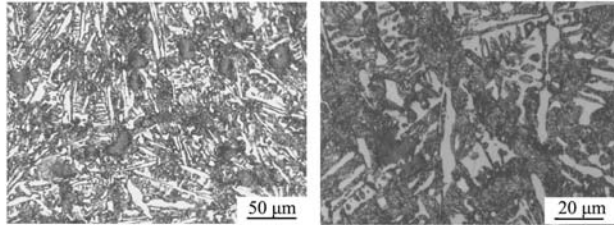
(a) 低倍

(b) 高倍

图3 水-空交替等温淬火CADI-50磨球中心部位微观组织

Fig. 3 The microstructures in the center of the CADI-50 ball treated by the water and air alternating isothermal quenching heat treatment

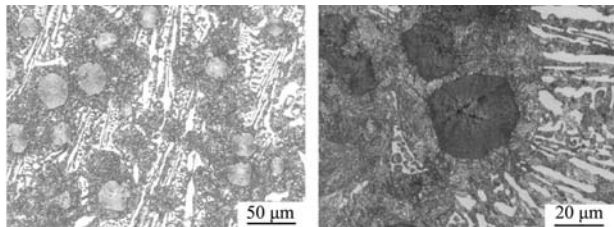
图4和图5为CADI-60磨球表面和中心部位的微观组织,组织构成与CADI-50磨球一致,不同的是,



(a) 低倍 (b) 高倍

图4 水-空交替等温淬火CADI-60磨球表层微观组织

Fig. 4 The microstructures on the surface of the CADI-60 ball treated by the water and air alternating isothermal quenching heat treatment



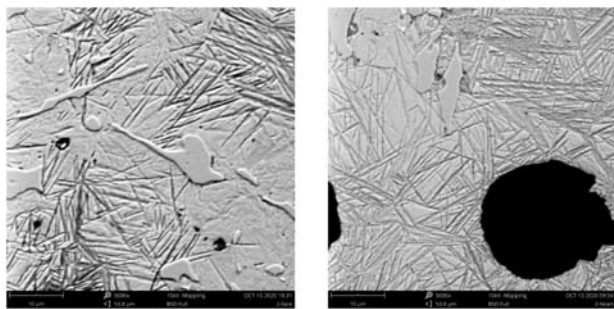
(a) 低倍 (b) 高倍

图5 水-空交替等温淬火CADI-60磨球中心部位微观组织

Fig. 5 The microstructures in the center of the CADI-60 ball treated by the water and air alternating isothermal quenching heat treatment

因 $\Phi 60$  mm磨球冷却速率低于 $\Phi 50$  mm磨球, 所以其显微组织略显粗大。经测, 其表层碳化物含量约17%~20%, 心部碳化物含量约12%~16%。

图6和图7为CADI-50/60磨球表面和中心部位的SEM微观组织, 可以看出, 均由针状铁素体和白色块状的残留奥氏体组成。不同的是, 磨球表层含有一定量浅白色的淬火马氏体, 磨球心部由杂乱无定向的下贝氏体组成。



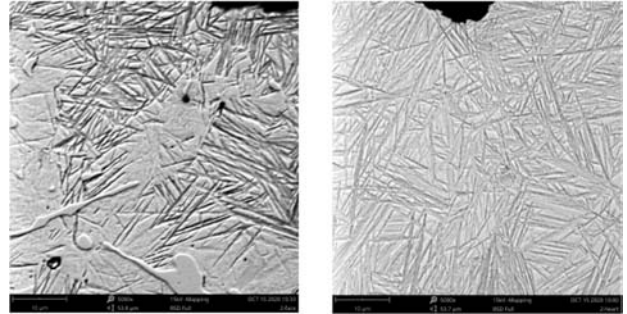
(a) 表层 (b) 中心

图6 水-空交替等温淬火CADI-50磨球SEM微观结构

Fig. 6 SEM microstructures of the CADI-50 ball treated by the water and air alternating isothermal quenching heat treatment

## 2.2 水-空交替等温淬火CADI磨球的力学性能

表3为工业化生产的水-空交替等温淬火CADI磨球力学性能。经测, CADI-50及CADI-60磨球, 其表面硬度均达到HRC56以上, 心表硬度差HRC $\leq 2$ , 冲击吸收能量 $\geq 4$  J。



(a) 表层 (b) 中心

图7 水-空交替等温淬火CADI-60磨球SEM微观结构

Fig. 7 SEM microstructures of the CADI-60 ball treated by the water and air alternating isothermal quenching heat treatment

表3 工业化生产的水-空交替等温淬火CADI磨球力学性能  
Table 3 Mechanical properties of the mass-produced CADI ball by the water and air alternating isothermal quenching heat treatment

球别	表面平均 硬度HRC	心部平均 硬度HRC	心表硬度 差HRC	冲击吸 收能量/J
CADI-50	56.9	55.8	1.1	5.1
CADI-60	56.9	56.1	0.9	5.7

注: CADI-50球冲击样条长度为50 mm。

综上, 工业化生产的水-空交替等温淬火CADI-50及CADI-60磨球, 心表金相组织构成合理, 分布均匀, 力学性能具有良好的一致性, 符合标准T/CFA 020101242—2021《含碳化物等温淬火球墨铸铁磨球》要求。

## 3 水-空交替等温淬火CADI磨球的应用效果

山西太钢某选矿厂对水-空交替等温淬火CADI磨球进行试用, 并与同期相同工况下使用的轧制磨球进行对比, 轧球成分如表4所示。在使用现场对不同类别的使用前和使用后的磨球各取3个检测表层硬度。具体检测结果见表5。

表4 轧球化学成分

Table 4 Chemical compositions of the rolling grinding balls

	$w_B / \%$							
轧球	C	Si	Mn	Cr	Mo	S	P	Fe
$\Phi 50$ mm	0.946	0.511	0.83	0.527	0.018	0.013	0.003	余量
$\Phi 60$ mm	0.845	0.481	0.829	0.534	0.023	0.015	0.002	余量

水-空交替等温淬火CADI磨球运转3个月后, 观察试用情况如表6所示。从对比数据可以看出, 在该工况条件下, CADI磨球变形率较轧球降低4.18%, 单耗降低0.022%, 磨机功率降低163.91 kW。

根据磨球试运行期间的表现, 对CADI磨球热处理

表5 CADI磨球与轧球表层硬度对比  
Table 5 Comparison of the surface hardness of the CADI and rolling grinding balls

球别	状态	硬度HRC			平均值HRC
CADI-50	使用前	56.8	56.9	57.5	57.0
CADI-60	使用前	57.2	57.0	56.1	56.7
CADI-50/60	使用后	63.0	63.6	64.2	63.6
轧球-50	使用前	61.0	59.6	61.2	60.6
轧球-60	使用前	60.5	60.5	60.0	60.3
轧球-50/60	使用后	62.5	63.2	61.5	62.4

表6 CADI磨球与轧球使用数据对比  
Table 6 Comparison of the service performance of the CADI ball and rolling ball

项目	Φ60/50 mm轧球	Φ60/50 mm铸球	对比结果
充填率/%	25.58	25.73	0.15
变形球比例/%	31.04	26.86	-4.18
磨球单耗/(kg·t <sup>-1</sup> )	0.856	0.834	-0.022
磨机功率/kW	8 966.39	8 802.48	-163.91

#### 参考文献:

- [1] 胡小锋, 闫德胜, 戎利建, 等. CADI材料微观组织及其耐磨性能的研究 [J]. 铸造, 2014 (5): 419-423.
- [2] 姚永茂, 周健, 陈全心, 等. 两种热处理工艺对CADI铸球力学性能和耐磨性的影响 [J]. 铸造, 2017 (7): 749-753.
- [3] 钟兆栋, 陈灿光, 桂劲松, 等. 不同热处理工艺对大直径CADI磨球微观组织和性能的影响 [J]. 铸造, 2021 (4): 1-6.

工艺进行调整, 7月21-8月20日的统计单耗降至8.1 kg/t, 同期轧球单耗为0.84 kg/t; 至9月份后, 基本达到了0.78 kg/t以下, 达到了设计要求, 取得了预期效果。

## 4 结论与展望

(1) 多循环水-空交替等温淬火在实际工业化生产中是可以实现精准控制的, 工业化批量生产的CADI磨球产品组织及性能具有良好的一致性, 符合标准要求。

(2) 经多循环水-空交替等温淬火处理的CADI磨球, 金相组织构成合理, 分布均匀, 力学性能合格、稳定, 在实际应用中取得了良好效果。

(3) 水-空交替等温淬火工艺在一部分CADI磨球生产中可以替代盐浴和油淬等温淬火工艺, 改善工作环境, 降低对人和设备的损害, 为创建节能环保型绿色铸造环境提供新的解决思路。

## Industrial Practice and Application of Alternating Isothermal Quenching CADI Ball by Water and Air

CHEN Can-guang<sup>1</sup>, YAO Yong-mao<sup>1</sup>, CHEN Quan-xin<sup>1</sup>, GUI Jin-song<sup>1</sup>, FANG Jian-feng<sup>1</sup>, WANG Yong-zhe<sup>2</sup>, TU Xiao-hui<sup>2</sup>, LI Wei<sup>2</sup>

(1. Ningguo Huafeng Wear Resistant Materials Co., Ltd., Ningguo 242300, Anhui, China; 2. Institute of Advanced Wear & Corrosion Resistance and Functional Materials, Jinan University, Guangzhou 510632, Guangdong, China)

#### Abstract:

CADI grinding ball is a kind of grinding medium widely used in mining, building materials and other industries. In order to control its structure and improve its performance, the CADI ball is usually isothermal quenching treated by mineral oil or molten salt. However, the mineral oil or molten salt as cooling medium usually has a series of problems, such as environmental pollution, health hazards, safety risks, and energy waste. In this paper, the method of alternating isothermal quenching by water and air was adopted to treat the CADI ball, and the whole cooling process was precisely controlled by specific equipment and technological means. The results showed that the treated CADI balls had similar microstructure and wear resistance compared with those of the oil or salt bath isothermal quenching. The mass-produced CADI balls by this process had good consistency. Their metallographic structure and mechanical properties met the standard requirements, achieving a good effect in practical application.

#### Key words:

CADI grinding balls; alternating isothermal quenching by water and air; heat treatment