

两种热处理工艺对CADI铸球力学性能和耐磨性的影响

姚永茂¹, 周 健², 陈全心¹, 陈灿光¹, 李 卫²

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

摘要: 分别采用盐浴等温淬火和油淬+空气中等温处理对同样化学成分的CADI铸球进行热处理。结果表明: 两种热处理工艺铸球的显微组织均为石墨球、碳化物、针状铁素体和残余奥氏体组成, 硬韧性匹配较好, 铸球的硬度和冲击韧性相近。油淬+空气中等温处理铸球表面耐磨性略好于盐浴等温处理, 盐浴等温处理铸球心部耐磨性略好于油淬+空气中等温处理。可采用油淬+空气中等温处理工艺替代盐浴等温热处理工艺处理CADI铸球。

关键词: CADI铸球; 盐浴等温热处理; 油淬+空气等温处理

中图分类号: TG143.5 文献标识码: A 文章编号: 1001-4977 (2017) 07-0749-05

Mechanical Properties and Wear Resistance of the CADI Balls Treated by Two Kinds of Heat Treatment

YAO Yong-mao¹, ZHOU Jian², CHEN Quan-xin¹, CHEN Can-guang¹, LI Wei²

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

Abstract: The CADI balls with the same chemical compositions were treated by two different methods, namely salt bath isothermal heat treatment and oil quenching air isothermal treatment. The test results show that the both microstructures of CADI balls treated by the two methods are spherical graphite, carbide, acicular ferrite and retained austenite and their hardness and toughness match well and are similar. The surface wear resistance by oil quenching and air isothermal treatment is better than that by salt bath isothermal quenching, while the core wear resistance is opposite. So oil quenching and air isothermal treatment can substitute for salt bath isothermal quenching treatment in treating the CADI casting balls.

Key words: CADI casting ball; salt bath isothermal heat treatment; oil quenching and air isothermal treatment

1 盐浴等温热处理工艺的优缺点

含碳化物奥铁体球墨铸铁 (Carbide Austempered Ductile Iron, 简称CADI) 是近些年由等温淬火球墨铸铁发展而来的新型耐磨材料, 具有高的韧性和硬度匹配, 具有优良的耐磨性能, 近几年CADI铸球在冶金矿山等行业大型磨机中得到较广泛应用。目前CADI铸球热处理工艺一般采用盐浴等温处理。盐浴等温处理工艺具有工艺稳定性好, 等温温度易于控制, 产品质量稳定等诸多优点。但亦有一些缺点: ①盐浴热处理生产线投资大, 比油淬热处理生产线投资高40%~50%。②高温铸件淬火时易使硝酸钠盐和硝酸钾盐蒸发产生盐蒸气, 刺激眼睛和皮肤引起灼伤; 而且盐蒸气是强腐蚀性气体, 对周围金属设备产生腐蚀作用, 对环境有不利影响; ③淬火后盐易粘结在铸球表面上, 需采用清水冲洗清除残盐; 清洗后的污水在排放前需作除

盐二次净化处理, 否则不能排放, 这也是大量生产中的一个难题; ④盐浴炉内易沉淀氧化铁皮和杂质, 这些杂物较硬, 冷却后与固态盐混合在一起很难分离, 难以清除; ⑤盐浴等温工艺用盐量大, 而盐的热容量大, 盐池升温和降温慢, 不能根据不同规格铸球性能要求快速、灵活地调整工艺; ⑥盐浴淬火生产成本较高, 与油淬等温工艺相比, 成本高1倍以上^[1]。上述诸多缺点影响了CADI盐浴等温热处理工艺在铸球行业的推广应用。

2 油淬+空气中等温处理设想

耐磨材料行业原来采用的铬系铸球较多, 其中以中高铬铸球为主, 热处理主要采用推杆式连续热处理生产线, 冷却介质以淬火油为主。在CADI铸球市场不确定的情况下, 如果再加上盐浴等温热处理生产线, 企业不敢轻易投资, 都持观望态度。如果能采用原来的

收稿日期: 2017-03-23收到初稿, 2017-05-09收到修订稿。

作者简介: 姚永茂 (1940-), 男, 高工, 研究方向为耐磨材料。E-mail: yaoyym40@163.com

油淬热处理生产线生产CADI铸球，这样一条推杆式连续热处理生产线既可以处理高铬铸球，也可以处理CADI铸球，企业不新增设备就可以生产CADI铸球。借鉴我国20世纪80年代开发贝氏体和马氏体球铁磨球的经验^[2]，其热处理工艺就是台车炉加热，在水玻璃溶液中连续冷却淬火，然后回火。限于当时的热处理设备和淬火介质条件，球铁磨球产品质量不很稳定，因此推广应用受到一定限制。尽管如此，这已说明了盐浴等温不是获得贝氏体组织唯一的热处理工艺方法，可以寻找适合铸球行业更简便的热处理工艺方法。

宁国市华丰耐磨材料有限公司于2011年开始试验生产CADI铸球，热处理采用原高铬铸球用的推杆式连续热处理生产线加热，淬火采用油淬+连续回火炉空气中等温处理，并初步获得成功。要稳定产品质量，工艺参数的设定需要做大量基础工作。铸球规格有十多种，最大直径150 mm，最小直径40 mm，每种规格铸球在油中淬火时间、出油温度、油温控制、等温温度、等温时间等基础数据要通过大量试验才能确定，然后编入程序，由PC机进行控制。经过多年试验摸索，现在工艺已经稳定，产品质量可靠。

3 两种工艺对比

为对比研究油淬+空气中等温处理与盐浴等温热处理CADI铸球的性能，我公司与暨南大学先进耐磨蚀及功能材料研究院开展合作。选择同一包铁液浇注的Φ80 mm铸球30个，分为两组，分别进行盐浴等温和油淬+空气中等温两种热处理。两组铸球中，分别随机挑选3个铸球经线切割取样，检测金相组织、力学性能和耐磨性。

3.1 试验情况

铸球化学成分见表1。铸球从室温加热到680℃，保温1 h，升温到780℃，保温1 h，再升温到880℃，保温2.5 h，进行淬火处理。两种等温热处理工艺图见表2和图1、图2。

表1 铸球化学成分

C	Si	Mn	Cr	S	P
3.58	2.94	2.53	0.5	0.026	0.027

表2 铸球等温热处理工艺参数

编号	热处理方式	工艺参数设定
A	盐浴等温	直接在240℃盐浴炉中保温4 h
B	油淬+空气中等温	油淬到220℃取出放在240℃箱式炉中保温4 h

3.2 CADI铸球铸态显微组织

球化效果分析，见表3。铸态球表面的石墨球数量比磨球心部多，表面石墨球略小于心部，表面球化率

略高于心部，金相照片见图3、图4。铸球在凝固后期会出现球化衰退，部分石墨球聚集长大，少量球状石墨发生畸变，所以出现上述现象。

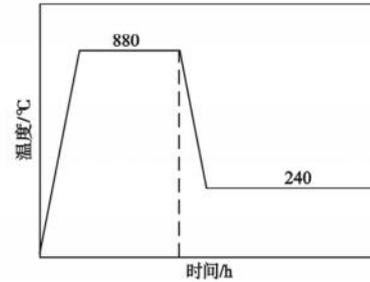


图1 盐浴等温淬火 (A)

Fig. 1 Salt bath isothermal quenching (A)

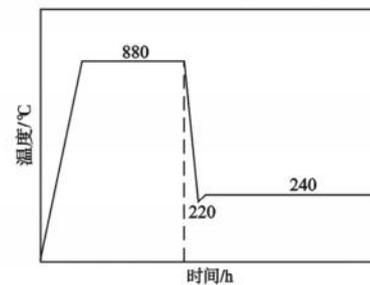


图2 油淬+空气中等温处理 (B)

Fig. 2 Oil quenching + air isothermal heat treatment (B)

表3 球化效果评定

Table 3 Evaluation of balling effect

位置	球化率/%	球化等级	石墨大小/ μm	大小等级	石墨球数
球表面	85.33	3	1.98	7	299
球中心	82.26	3	2.16	7	254

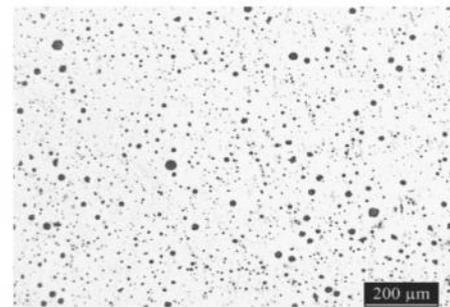


图3 铸球表面石墨形貌

Fig. 3 Graphite morphology of the ball surface

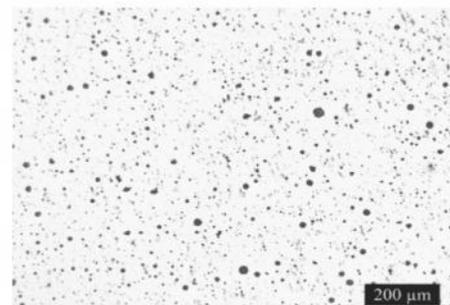


图4 铸球心部石墨形貌

Fig. 4 Graphite morphology of the ball core

用4%的硝酸酒精对试样进行腐蚀，球心部和距球表5 mm处的金相组织见图5和图6。如图所示，铸态试样无论铸球表面还是铸球心部，其铸态组织都是由球状石墨、珠光体、碳化物和少量铁素体组成。距铸球

表面5 mm处试样碳化物体积分数约占17.6%，珠光体体积分数约占74.1%，石墨球附近还有少量铁素体；铸球心部碳化物体积分数约占22%，珠光体体积分数约占73.8%，石墨球附近也有少量铁素体。

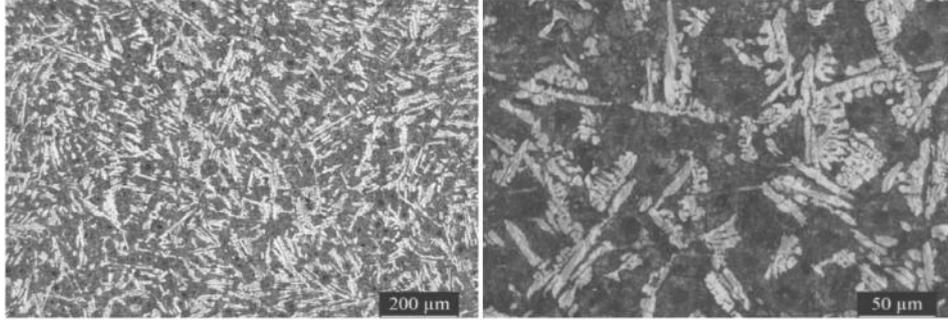


图5 铸球表面铸态组织

Fig. 5 Microstructure of the ball surface as cast

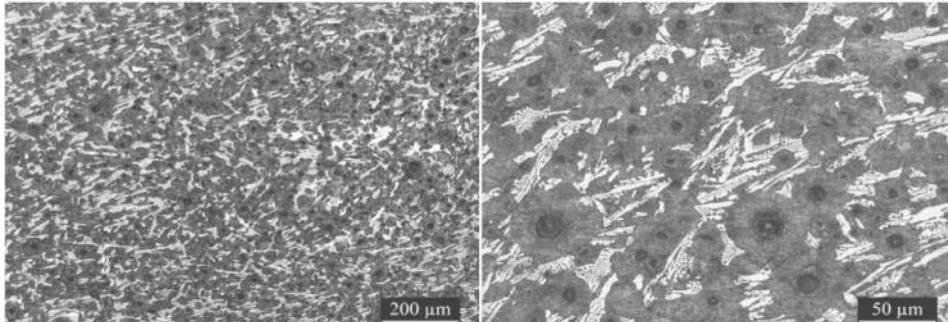


图6 铸球心部铸态组织

Fig. 6 Microstructure of the ball core as cast

3.3 等温热处理后检测

3.3.1 力学性能

从力学性能分析，两种等温热处理工艺下相差很小，盐浴等温淬火铸球心部硬度高HRC 0.6，但冲击韧性低0.4 J，见表4。

表4 力学性能

Table 4 The mechanical properties of balls

试样 编号	硬度HRC (球心距离)					冲击 吸收功/J	
	0	10 mm	20 mm	30 mm	35 mm		
A	56.8	57.6	58.1	59.2	59.4	2.6	5.6
B	56.2	57.3	58.3	59.1	59.7	3.5	6.0

3.3.2 热处理态显微组织

同种成分铸球分别进行两种热处理，奥氏体化阶段溶解大量碳化物，形成成分均匀的高温奥氏体，高温奥氏体根据淬火过程冷却速度和淬火温度的不同发生不同的转变，形成不同种类、不同形貌的组织，从而影响铸球的性能。热处理后A、B两种工艺表面和心部显微组织如图7和图10。

结合试样成分和热处理工艺可以看出，A、B两组磨球经过热处理后，原基体组织的珠光体和铁素体消失，碳化物变少变小，基体主要是针状铁素体、残余奥氏体和碳化物组成，石墨球被基体包围，且周围的

针状铁素体大都呈放射状分布，由此可见针状铁素体优先在奥氏体和石墨球界面或者奥氏体晶界形核，之后再长大。

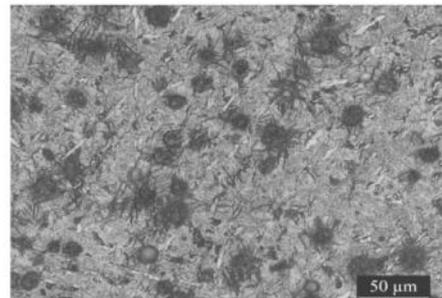


图7 A球表面热处理态组织

Fig. 7 Heat-treated microstructure of A ball surface

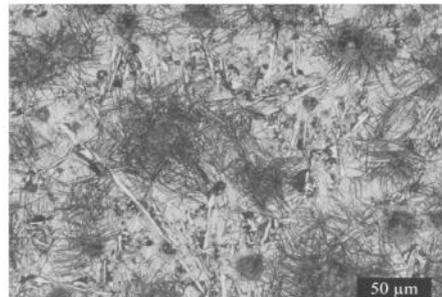


图8 A球心热处理态组织

Fig. 8 Heat-treated microstructure of A ball core

A磨球进行的是盐浴等温淬火热处理,本次试验盐浴为无水硝酸盐,熔盐温度设定为240℃。观察A磨球金相图片可知,在这么低的等温温度下距球表面5 mm处针状铁素体都很短小,但部分针状铁素体出现粗化,而铸球心部的针状铁素体则呈现出部分粗化且整体变长的组织形貌。这是因为对试验磨球来说,240℃硝酸盐浴冷却能力稍有不足,奥氏体组织在高于240℃的温度下就发生了相变,此时转变的针状铁素体组织相对粗大,而球心部冷却速度比球表面处小,相当于部分针状铁素体转变在更高的温度下发生,即产生了组织变长,部分粗化现象。

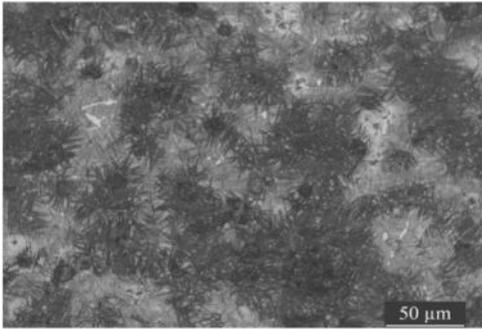


图9 B球表面热处理态组织

Fig. 9 Heat-treated microstructure of B ball surface

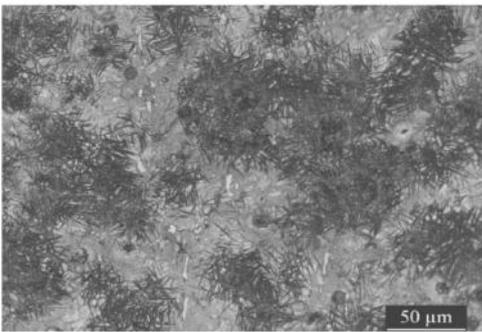


图10 B球心部热处理态组织

Fig. 10 Heat-treated microstructure of B ball core

B磨球是油淬+箱式电炉空气中等温热处理,淬火油温度设定在80℃,远低于设定的等温温度。观察图9和图10可知,距球表面5 mm处的针状铁素体组织短小细密,而铸球心部的组织出现部分呈“羽毛状”平行分布的针状铁素体,铁素体组织都较长。磨球在80℃淬火油中淬火至球表面温度达到220℃,然后快速送入240℃的箱式炉中等温,油温相对较低,导致球表面冷却速度比球心部冷却速度高很多,当球表面温度降到220℃时,球心部还处在较高温度。箱式炉中以空气为传热介质,控温能力较差,导致磨球球心部位在相对很高的温度下发生针状铁素体相变,而磨球球表面却在较低的温度下发生针状铁素体相变,从而造成磨球内外的组织差异。

如图11-图14所示,对两种不同热处理方式试样的球心部和球表面做X射线衍射分析,均出现α和γ相,

证实了残余奥氏体的存在,同时出现了M₇C₃型的碳化物。

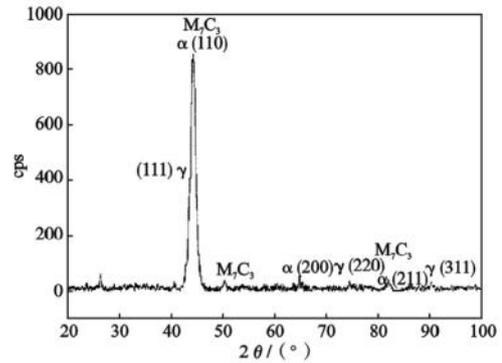


图11 A球表面X射线衍射谱

Fig. 11 X-ray diffraction spectrum of A ball surface

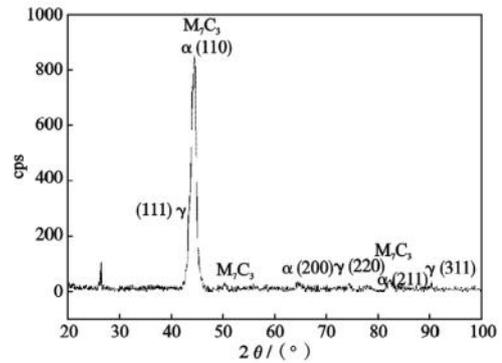


图12 A球心部X射线衍射谱

Fig. 12 X-ray diffraction spectrum of A ball core

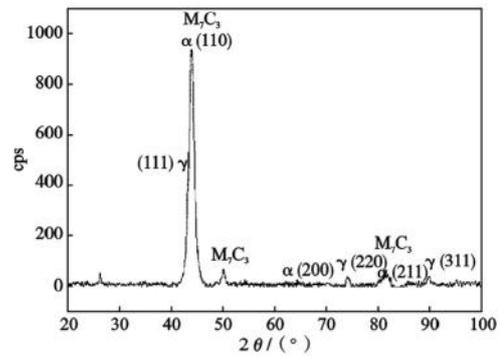


图13 B球表面X射线衍射谱

Fig. 13 X-ray diffraction spectrum of B ball surface

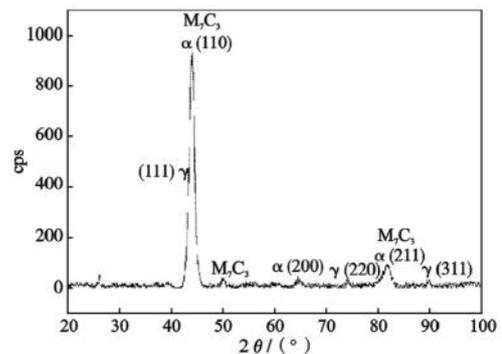


图14 B球心部X射线衍射谱

Fig. 14 X-ray diffraction spectrum of B ball core

3.4 磨损试验

试验采用改装后的MLD-10冲击磨料磨损试验机,选取1 J冲击能量下的冲击磨料磨损试验,试样磨损面选在距球心5 mm和35 mm两处,试验数据见表5。

表5 磨损失重

Table 5 The wear weightlessness

试样编号	15 min失重/g	30 min失重/g	45min失重/g	60min失重/g
A距球心35mm	0.311 2	0.611 2	0.916 3	1.098 5
B距球心35mm	0.308 6	0.598 2	0.892 9	1.072 1
A距球心5mm	0.304 4	0.606 1	0.901 4	1.160 6
B距球心5mm	0.324 5	0.648 3	0.929 0	1.201 6

从表中数据可知,油淬+空气中等温处理的铸球表面耐磨性略好于盐浴等温处理,盐浴等温处理的铸球心部耐磨性能略好于油淬+空气中等温处理。

综上所述,CADI铸球采用盐浴等温淬火和油淬+箱式电炉空气中等温处理两种等温热处理工艺情况下,铸球试样具有相近的力学性能和耐磨性能,因此CADI铸球可以采用油淬+空气中等温处理工艺替代盐浴等温热处理工艺。

4 结论

(1) 盐浴等温淬火热处理和油淬+箱式电炉空气中等温处理磨球的显微组织均主要由石墨球、碳化物、针状铁素体和残余奥氏体组成。

(2) 盐浴等温淬火和油淬+箱式电炉空气中等温处理磨球硬韧性匹配较好,且两种热处理磨球的硬度和冲击韧性相近。

(3) 油淬+空气中等温处理铸球表面耐磨性略好于盐浴等温处理,盐浴等温处理铸球心部耐磨性略好于油淬+空气中等温处理。

(4) CADI铸球可以采用油淬+空气中等温处理工艺替代盐浴等温热处理工艺。

参考文献:

- [1] 李树中. 关于盐浴淬火的若干问题 [J]. 金属热处理, 1991 (5): 59-61.
- [2] 梁吉, 高志栋, 柳葆钻, 等. 新型贝氏体球墨铸铁磨球的研究 [J]. 铸造, 1990 (6): 1-6.

(编辑: 潘继勇, pjy@foundryworld.com)

(选自《铸造》2017年第7期)