

CADI 磨球异常组织分析与对策

陈灿光¹, 徐锦锋², 陈全心¹, 姚永茂¹, 吴明忠¹, 桂劲松¹, 韩 非²

(1. 宁国市华丰耐磨材料有限公司, 安徽 宁国 242300; 2. 西安理工大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 采用标准金相技术并借助光学金相显微镜和扫描电镜, 分别沿直径方向对铸态和淬火态磨球的微观组织进行了观察, 对比分析了国内磨球与蒙古磨球由表层至心部的铸态组织和淬火态组织的差异, 揭示了磨球表面激冷层相组成对磨球整体传热过程的作用机制。结果表明, 从改善铸态组织和降低奥氏体稳定性两方面出发, 提出了化学成分的调整方向, 成功地解决了蒙古 CADI 磨球组织异常、心部淬不到、性能不达标等的生产难题。

关键词: CADI; 磨球; 淬透性; 微观组织

中图分类号: TG135

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2020)08-0710-05

Analysis and Countermeasures of CADI Grinding Ball Abnormal Structure

CHEN Canguang¹, XU Jinfeng², CHEN Quanxin¹, YAO Yongmao¹, WU Mingzhong¹,
GUI Jinsong¹, HAN Fei²

(1. Ningguo Huafeng Wear-resistant Material Co., Ltd., Ningguo 242300, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The microstructure of as-cast and quenched grinding balls was observed in the diameter direction by means of standard metallographic technique, optical metallographic microscope and scanning electron microscope (SEM). The differences of as-cast and quenched microstructure between domestic and Mongolian grinding balls from the surface to the heart were compared and analyzed. The mechanism of the effect of the composition of the surface chilling layer on the overall heat transfer process of the grinding ball was revealed. The results show that the adjustment direction of chemical composition is proposed from the two aspects of improving as-cast microstructure and reducing austenite stability. The production problems of CADI grinding ball in Mongolia, such as abnormal microstructure, unquenchable center and substandard performance, are solved successfully.

Key words: CADI; grinding balls; hardenability; microstructure

为了响应国家“一带一路”发展战略, 2018 年宁国市华丰耐磨材料有限公司在蒙古国合资新建了蒙古国富友华丰耐磨材料有限公司。同时, 将国内公司成熟的奥铁体磨球生产工艺移植到蒙古公司, 用于生产 $\phi 120$ mm 的 CADI (含碳化物等温淬火球墨铸铁) 磨球。然而, 在成分、球化和热处理工艺相同的条件下, 蒙古公司生产的 CADI 磨球出现了组织异常、心部淬不透、性能不达标等问题, 阻碍了项目的正常进行。其问题具体表现为: ①铸态蒙古磨球的硬度 (25~29 HRC) 较铸态国内的磨球 (38~45 HRC) 低; ②淬火态蒙古磨球的性能未能达

到要求, 心部硬度较低, 比表面低了 10 HRC, 且韧性较差, 为 7.2 KN₂/J。其中, 淬火态蒙古公司磨球用线切割沿磨球心部抽取 10 mm×10 mm×120 mm 样条 1 根, 表面打磨处理后, 由表层至心部不同位置用洛氏硬度计检测硬度, 测试结果见表 1; ③在淬火态蒙古磨球的基体组织中, 分层现象明显, 表层奥氏体数量较多, 铁素体针较粗大, 碳化物数量较少; 但心部为珠光体基体, 碳化物数量较多; ④将铸态蒙古磨球表层的异常组织去除后, 则可以淬透。

表 1 淬火态蒙古磨球的硬度

Tab.1 Hardness of quenched Mongolian grinding balls

离表面距离/mm	0	10	20	30	40	50	60
洛氏硬度 C 级/HRC	50.2	50	47.8	42.5	40.7	39.7	39.5

为此, 从磨球的化学成分、原辅材料、球化及热处理工艺、淬火介质和微观组织以及生产过程控制等方面做了分析和排查, 但仍未找到问题产生的根源。针对该技术难题, 华丰公司与西安理工大学合作, 对 $\phi 120$ mm 磨球沿直径方向进行解剖, 采用标

收稿日期: 2020-05-07

作者简介: 陈灿光(1986-), 安徽蚌埠人, 本科, 助理工程师。主要从事耐磨材料的生产与应用方面的工作。

电话: 15345635221, Email: 79352470@qq.com

通讯作者: 徐锦锋(1963-), 陕西岐山人, 教授。研究方向: 铸造合金组织与性能。电话: 13325389318, Email: jinfengxu@xaut.edu.cn

准金相技术,并借助光学显微镜(OM)和扫描电镜(SEM)对蒙古公司生产的铸态和淬火态磨球的微观组织进行观察,对比分析磨球表层和心部的组织差异,揭示磨球表面激冷层相组成对磨球整体传热过程的作用机制,以期保障蒙古公司 $\phi 120\text{mm}$ CADI磨球的正常生产。

1 $\phi 120\text{ mm}$ CADI磨球的化学成分及性能要求

生产中磨球的化学成分和力学性能列入表2。

2 国内 $\phi 120\text{ mm}$ 磨球的微观组织

2.1 铸态国内磨球的微观组织

图1为国内铸态磨球的微观组织。由图可知,国内磨球由表层至心部的铸态组织均由珠光体+少量铁素体+细小的石墨球+碳化物组成。随着离开磨球表面距离的增加,珠光体和碳化物逐渐粗化,莱氏体的占比逐渐增大。

2.2 淬火态国内磨球的微观组织

图2为淬火态国内磨球的微观组织。由图可

知,国内磨球由表层至心部的淬火态组织均由奥铁体+碳化物+细小的球墨组成,且奥铁体和碳化物组织分布均匀。同时,随着离开磨球表面距离的增加,淬火组织发生粗化,碳化物数量趋于增多。

3 蒙古 $\phi 120\text{ mm}$ CADI磨球的微观组织

3.1 铸态蒙古磨球的微观组织

蒙古磨球的铸态组织如图3所示。从图中可以看出,磨球表层的铸态组织由珠光体+少量铁素体+微量碳化物+球状石墨组成;次表层的铸态组织由珠光体+极少量铁素体+少量碳化物+球状石墨组成,其中,珠光体层间距略有增大;心部的铸态组织则为粗片状珠光体+大量碳化物+球状石墨。随着离开磨球表面距离的增大,冷却速率下降,基体中莱氏体数量增多,珠光体层间距增大。图4为蒙古磨球铸态组织的二次电子像。由图可知,磨球各区域的相组成基本相同,铸态组织均由极细珠光体+球状石墨+少量碳化物组成;随着离开磨球表层距离的增大,珠光体由极细珠光体(屈氏体)向粗片状珠光体转

表2 $\phi 120\text{ mm}$ CADI磨球的化学成分和力学性能要求
Tab. 2 Chemical composition and mechanical properties of $\phi 120\text{ mm}$ CADI grinding balls

化学成分 $w(\%)$									力学性能		
C	Si	Mn	Cr	Mo	Cu	S	P	Fe	表面硬度 (HRC)	心部与表面硬度差 (HRC)	kN/J
3.4~3.8	2.5~3.0	1.5~1.8	0.2~0.5	0.05~0.10	0.2~0.3	≤ 0.03	≤ 0.05	余量	48-52	≤ 4	≥ 12

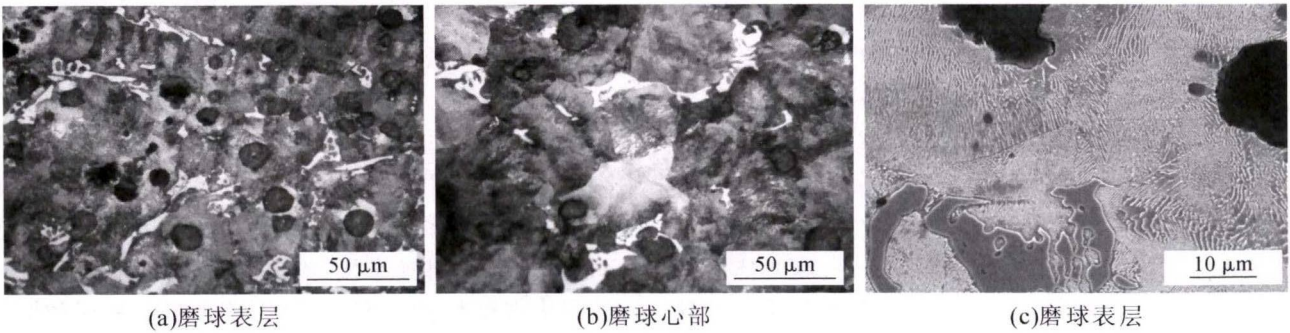


图1 铸态国内磨球的微观组织
Fig.1 Microstructure of as-cast domestic grinding balls

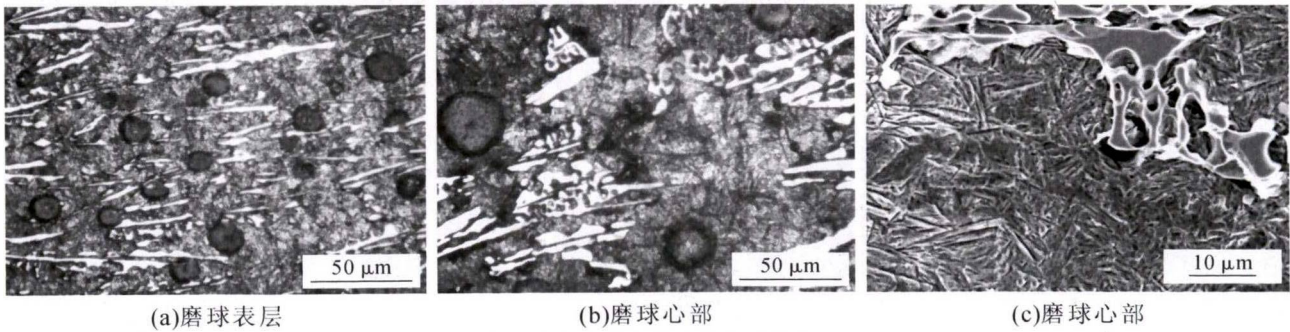


图2 淬火态国内磨球的微观组织
Fig.2 Microstructure of quenched domestic grinding balls

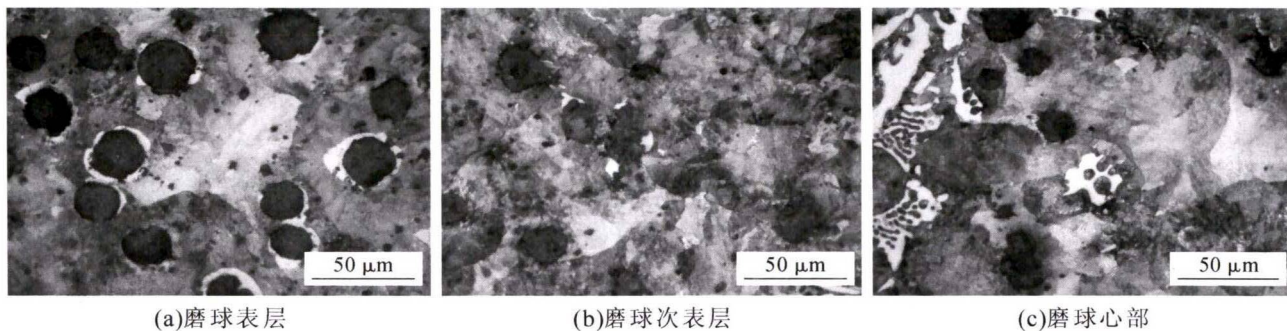


图3 铸态蒙古磨球的微观组织
Fig.3 Microstructure of as-cast Mongolian grinding balls

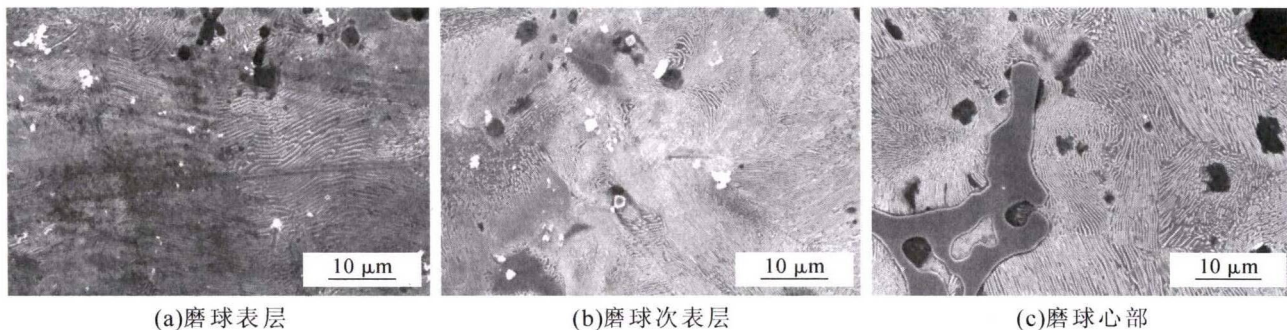


图4 铸态蒙古磨球的二次电子像
Fig.4 Secondary electron images of as-cast Mongolian grinding balls

变,碳化物数量增多且形态粗化,少量铁素体趋于消失。

3.2 淬火态蒙古磨球的微观组织形貌

蒙古磨球的淬火态组织如图5所示。从图中可以看出,磨球表层的淬火态组织由粗大奥铁体+残余奥氏体+少量碳化物+球状石墨组成,其中,针状铁素体尺寸较长,残余奥氏体数量较多;次表层的淬火态组织由较粗大奥铁体+残余奥氏体+珠光体+少量碳化物+球状石墨组成;心部的淬火态组织由珠光体+大量碳化物+球状石墨组成。随着离开磨球表面距离的增大,奥铁体数量和残余奥氏体数量逐渐减少,珠光体数量趋于增多。相比之下,蒙古磨球铸态组织中石墨球较粗大,球数较少,珠光体层片间距较大,碳化物析出数量较少。图6为蒙古磨球淬火态组织的二次电子像。由图可知,蒙古磨球淬

火态组织的金相观察结果与扫描电镜观察结果相一致,由表层至次表层再到心部,基体组织由奥铁体+残余奥氏体+极少量碳化物的相组成向珠光体+碳化物的相组成转变。其中,在距离表面约20 mm以内,随着离开表面距离的增大,奥铁体中的针状铁素体由长变短,奥铁体和残余奥氏体数量趋于减少,直至在距离表面约20 mm处,基体中几乎不再存在奥铁体和残余奥氏体组织,同时珠光体数量逐渐增多。

综上所述,与国内磨球的铸态组织和淬火态组织相比,铸态蒙古磨球组织中碳化物析出数量少,淬火态表层组织中奥铁体数量少、针状铁素体粗大,残余奥氏体数量多,且心部未能形成奥铁体组织。这说明蒙古磨球冷却速率慢,淬透性不足,难以形成适量的碳化物和奥铁体组织,因而铸态和淬火态蒙古磨球的硬度均低于国内磨球。

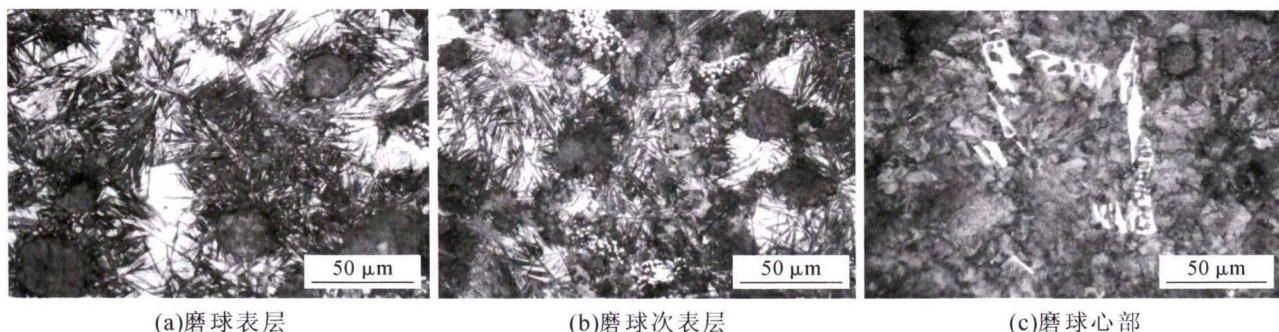


图5 淬火态蒙古磨球的微观组织
Fig.5 Microstructure of quenched Mongolian grinding balls

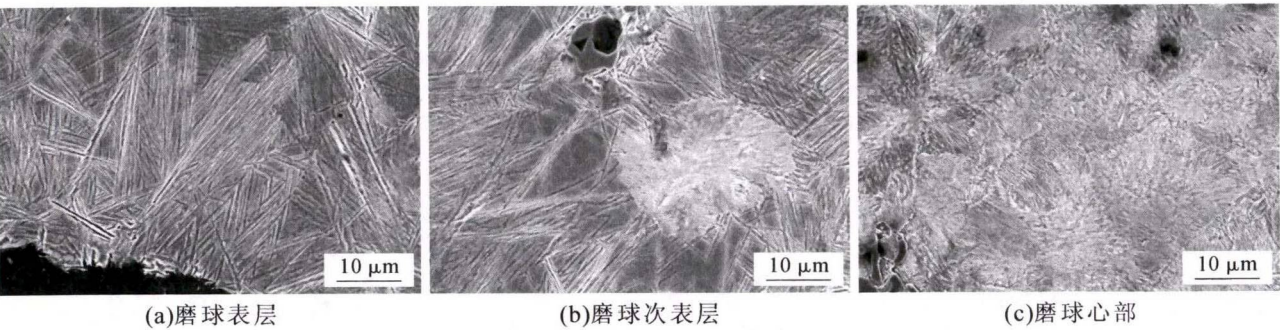


图 6 淬火态蒙古磨球的二次电子像
Fig.6 Secondary electron images of quenched Mongolian grinding balls

4 淬火态蒙古磨球异常组织成因分析

蒙古磨球采用铁模覆砂工艺来生产,冷却速度和凝固速率略低于国内的铁模工艺,碳化物析出倾向小,因而,蒙古铸态磨球中牛眼铁素体数量相对较多,而碳化物析出数量相对较少。另外,与 Si 元素相比,Cr、Mo 等碳化物形成元素在奥氏体中固溶度小,在铁液中的扩散速度相对较快,在铁模覆砂条件下容易发生较长距离的扩散而富集于后凝固的磨球心部,从而使磨球心部碳化物数量增多。由于 Mn 元素在铁液中的扩散系数小,宏观偏析程度较轻,作为正偏析元素主要分布于奥氏体晶界。锰在固态相变过程中降低临界温度,强烈提高过冷奥氏体的稳定性,使 C- 曲线右移,从而强烈推迟针状贝氏体转变,其作用大于 Cr、Ni、Si 等合金元素。而 Si 作为负偏析元素主要偏析于奥氏体中,加之其在铁液中的扩散速度比较快,容易富集于磨球表层,使表层硅含量升高^[1]。由于 Si 抑制贝氏体转变过程中碳化物的析出,使针状铁素体生长时排出的碳富集到奥氏体中,从而提高了过冷奥氏体的稳定性^[2,3]。在 Mn、Si 元素均偏高的情况下,大直径铸态蒙古磨球在等温转变过程中,磨球表层中形成了为数较多的残余奥氏体,而表层残余奥氏体的存在又影响了磨球内部的传热过程。奥氏体的热导率为 18.29 W/(m·K),远低于珠光体的热导率 30.06 W/(m·K),更低于铁素体的热导率 38.14 W/(m·K)^[4],亦即,淬火态蒙古磨球表层中大量残余奥氏体的存在显著地降低了磨球表层的传热能力,致使内部热量不易导出,冷速降低,容易发

生 $\gamma \rightarrow P$ 转变,因而磨球心部仍以珠光体转变为特征,形成了珠光体基体而不是奥铁体组织。这便是蒙古磨球内部淬不透,而剔除表层后可以淬透等反常现象发生的主因所在。

另外,铸态蒙古磨球微观组织中石墨球径大,球数少,相界面积小,热处理时奥氏体中碳浓度均匀化不足,导致各微区奥氏体稳定性存在差异,在一定程度上影响了珠光体转变和等温转变过程。

5 预防措施与解决方案

综上所述,蒙古磨球在铁模覆砂生产过程中所出现的异常组织,主要与磨球在凝固过程中冷速减缓、宏观偏析程度增大、奥氏体稳定性偏高、以及铸态组织粗大和碳化物析出数量少等有关。从改善铸态组织和降低奥氏体稳定性两方面考虑,化学成分的调整方向是:适当地降低 Mn、Si 含量,而提高 Mo、Cr、Cu 含量。化学成分调整如下,见表 3。

5.1 力学性能

对调整成分的磨球在淬火油中进行等温淬火处理后,用线切割机在磨球心部取样条 4 根,一根用于检测硬度,其余用于测量心部及 1/2R 处的韧性。测试的力学性能见表 4。由表可知,化学成分调整后的淬火态 $\phi 120$ mmCADI 蒙古磨球的各项性能均达到 CADI 磨球性能指标要求。

5.2 球化效果

化学成分调整后,铸态 $\phi 120$ mmCADI 蒙古磨球的球化效果良好,具体球化参数和石墨形态见表 5 和图 7。

表3 $\phi 120$ mmCADI蒙古磨球化学成分调整方案
Tab. 3 Adjustment of chemical composition of $\phi 120$ mm CADI Mongolian grinding balls

元素	化学成分 w (%)								Fe
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Cu	S	P	
原方案	3.4~3.8	2.5~3.0	1.5~2.0	0.2~0.5	0.05~0.1	0.2~0.3	≤0.03	≤0.05	余量
改进方案	3.4~3.7	2.0~2.5	1.2~1.5	0.3~0.5	0.3~0.4	0.4~0.6	≤0.03	≤0.05	余量
实测成分	3.62	2.42	1.27	0.399	0.295	0.596	0.013	0.026	余量

表4 化学成分调整后淬火态 $\phi 120$ mmCADI蒙古磨球的力学性能
Tab. 4 Mechanical properties of quenched $\phi 120$ mm CADI Mongolian grinding balls after chemical composition adjustment

洛氏硬度 C 级(HRC)								韧性 kN/J	
表面	1/8 ϕ	2/8 ϕ	3/8 ϕ	心部	5/8 ϕ	6/8 ϕ	7/8 ϕ	对表面	1/2R 心部
51.8	53.2	52.8	51.8	51	51	51.7	52.8	52.7	12.5 13

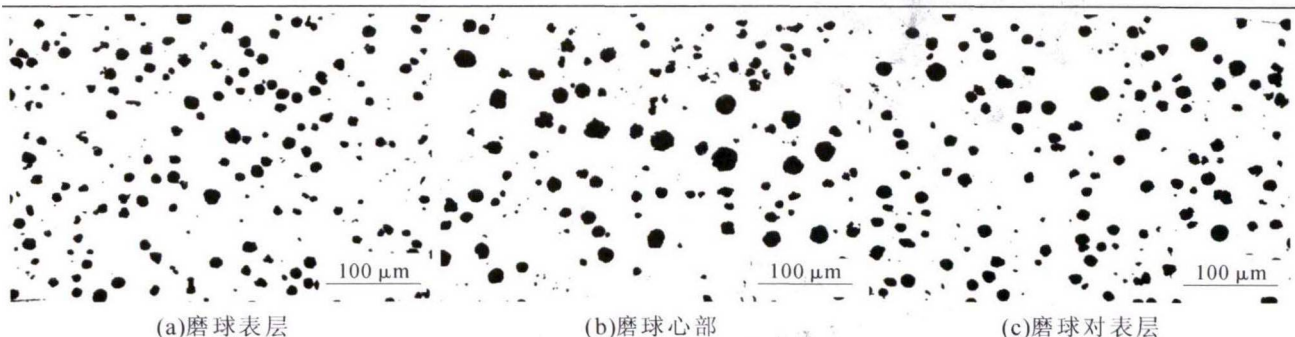


图7 试验磨球的石墨形态
Fig.7 Graphite morphology of the test grinding balls

表5 蒙古公司试验磨球的球化分析结果
Tab.5 Results of spheroidization analysis of test grinding balls by Mongolian company

球别	取样位置	球化率 (%)	球化级别	石墨平均大小 / μm	石墨级别	石墨个数 (个 / mm^2)
试验球	表面	91.30	2	18.5	7	278
	心部	89.82	3	19.5	7	273
	对表面	90.69	2	19.2	7	304

5.3 基体组织

图8 为试验蒙古磨球的淬火态组织。由图可

知,试验磨球淬火态的表面和心部组织均由奥铁体+碳化物+球状石墨组成,奥铁体组织细小,分布均匀,未发现珠光体组织。

6 结论

(1)铸态蒙古磨球在等温淬火过程中所出现的心部淬不透、硬度偏低等问题,主要与合金中锰量偏高所导致的表面层奥氏体稳定性升高有关。

(2)对于大直径 CADI 磨球,通过适当降低

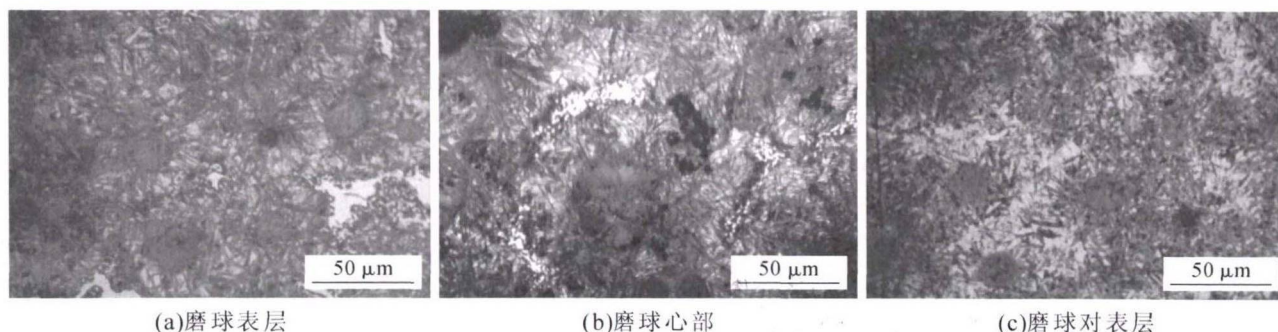


图8 试验磨球的淬火态组织
Fig.8 Quenched microstructures of the test grinding balls

Mn、Si 含量而增加 Mo、Cr、Cu 元素含量,可以有效促进针状铁素体转变,获得组织和性能优良的 CA DI 材质。

(3)推荐的 $\phi 120$ mmCADI 磨球化学成分 w (%) 为 3.4~3.7 C, 2.0~2.5 Si, 1.2~1.5 Mn, 0.3~0.5 Cr, 0.3~0.4 Mo, 0.4~0.6 Cu, ≤ 0.03 S, ≤ 0.05 P。

参考文献:

- [1] 曾大新,夏建元. 球墨铸铁反白口的形成原因及其防止[J]. 湖北汽车工业学院学报, 1997(4): 9-13.
- [2] 张婷. Cr 对 CADI 组织及性能的影响[D]. 郑州: 郑州大学, 2009.
- [3] 李路. 锰对含碳化物等温淬火球墨铸铁组织及性能的影响[D]. 郑州: 郑州大学, 2013.
- [4] 张伯明. 铸造手册 3 版, 第一卷, 铸铁[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.

欢迎到当地邮政局(所)订阅 2020 年《铸造技术》杂志

国内邮发代号: 52-64 国外发行号: M855 国内定价: 25 元/本 海外定价: 25 美元/本