

热处理工艺参数对矿用磨球力学性能的影响研究

陈曦, 代文彬, 祁永峰, 王书晓, 陈学刚

(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

[摘要] 为实现矿用磨球强韧性的进一步提升, 本文研究了不同热处理条件下磨球的力学性能、显微组织形貌及物相特征。结果表明, 不同热处理条件下磨球的显微组织均由马氏体、碳化物和残余奥氏体组成。基体的组织特征、碳化物的形态和分布、残余奥氏体的占比共同影响磨球性能: 随着奥氏体化温度的提高, 磨球硬度先升高后降低, 冲击韧性连续下降; 随着奥氏体保温时间的延长, 磨球的硬度和冲击韧性均先升高后降低; 随着回火温度的提高, 磨球硬度连续下降, 冲击韧性波动性上升; 随着回火保温时间的延长, 磨球硬度变化不大, 冲击韧性呈下降趋势。对于实验磨球, 较佳的热处理参数为: 950 °C 保温 3 h, 快速入油淬火后 300 °C 保温 3 h 进行回火, 所得磨球洛氏硬度 62.58 HRC, 冲击功 4.92 J, 相比产品磨球可分别提高 5.2% 和 51.9%。

[关键词] 磨球; 热处理; 洛氏硬度; 冲击韧性; 显微组织

[中图分类号] TG164

[文献标志码] B

[文章编号] 1003-8884(2023)05-0015-06

DOI: 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2023.05.004

0 引言

磨球广泛应用于金属矿山、建材水泥、火力发电、耐火材料、化肥化工等行业领域, 全球每年的消耗量高达 3 000 ~ 5 000 万 t, 其中我国的年消耗量为 300 ~ 500 万 t^[1]。作为磨矿介质的磨球, 其使用寿命与粉磨工序的成本密切相关, 提高磨球使用寿命已然成为相关行业降本增效的重要手段。铬系铸铁作为一种优异的耐磨材料, 其降耗节球增益效果较好, 耐磨性是普通钢球的 10 倍以上^[2], 被普遍应用于球磨机磨球。其中, 高铬磨球以其优异的抗磨料磨损能力而应用最为广泛^[3-5]。高铬铸球基体组织一般为马氏体, 硬度较高, 但冲击韧性较差, 在使用过程中易出现断裂或表层剥落等脆性失效, 而硬度和韧性往往是互相制约的, 也是决定耐磨性能的重要因素。

因此, 为提升某矿用高铬磨球的强韧匹配, 满

足其在较高工况下同时具有高耐磨性及冲击韧性的要求, 本文利用马弗炉和显微组织观察和物相分析等表征手段, 对矿用磨球的热处理参数进行优化实验, 探索了奥氏体化温度、奥氏体化保温时间、回火温度、回火保温时间对磨球的洛氏硬度和冲击韧性的影响规律, 为合理热处理制度的建立提供理论依据。

1 实验材料及方法

本实验材料采用某厂的铸态 ZQCr12 高铬磨球, 其化学成分及该厂产品磨球力学性能见表 1, 可知产品磨球的冲击韧性较差, 仅为 3.24 J, 强韧性匹配有待进一步提升。

表 1 实验用 ZQCr12 磨球的成分及成品球的力学性能

分析项	化学成分/wt. %						洛氏硬度/HRC	冲击韧性/J
	C	Si	Mn	P	S	Cr		
数值	2.43	0.64	0.35	0.014	0.012	10.50	59.5	3.24

本实验的马弗炉热处理工艺参数探索实验的具体工艺路线如图 1 所示, 各参数试验范围为: 奥氏体化温度选取 850 ~ 1 000 °C, 奥氏体化保温时间为 1 ~ 5 h, 淬火介质选用淬火油, 回火温度为 200 ~ 600 °C, 回火保温时间为 1 ~ 5 h。温度梯度为 50 °C,

[收稿日期] 2023-06-26

[第一作者] 陈曦(1993—), 女, 山东聊城人, 工程师, 博士研究生, 主要从事金属合金化与相变及大宗工业固废处置方面的研究工作。

[引用格式] 陈曦, 代文彬, 祁永峰, 等. 热处理工艺参数对矿用磨球力学性能的影响研究[J]. 有色设备, 2023, 37(5): 15-20.

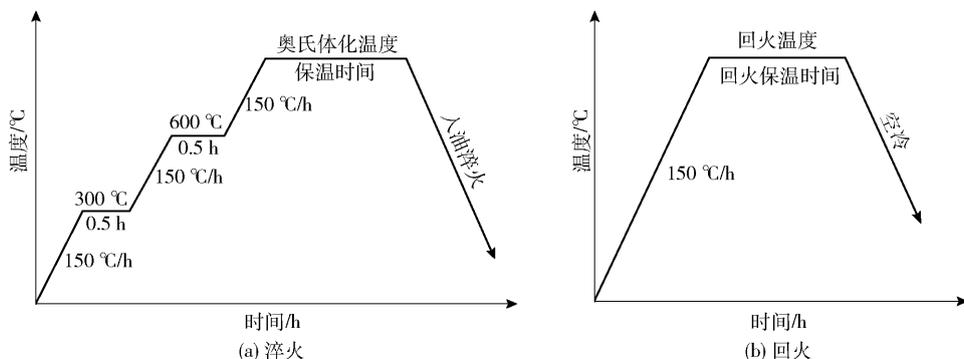


图 1 马弗炉淬、回火热处理工艺路线

保温时间梯度为 1 h。同时,为与磨球的生产情况保持一致,实验试样采用原始尺寸的铸球直接进行热处理,并选用三个平行样品进行试验。

利用线切割对磨球进行取样测试,其中:硬度测试试样的规格为 $30 \times 10 \times 10$ mm,利用 RB2000-T 型洛氏硬度计按照 GB/T 230.1—2018 标准^[6]相关要求进行洛氏硬度测试;采用 $10 \times 10 \times 55$ mm 的无缺口冲击试样,利用 JB-300B 型半自动摆锤式冲击试验机按照 GB/T 229—2020 标准^[7]相关要求冲击功测试;按照镶-磨-抛-侵流程制备金相样,利用 MX6R 型光学显微镜和 7900 场发射扫描电镜进行显微组织分析;采用连续式扫描,利用 Bruker-D8 Advance 型 X 射线衍射仪进行 XRD 测试,靶材为铜靶,衍射峰扫描范围为 $10^\circ(2\theta) \sim 90^\circ(2\theta)$ 。

2 实验结果与讨论

2.1 淬火条件对磨球组织和性能的影响

不同淬火条件下磨球的力学性能如图 2 所示。由图 2(a)可知,随着奥氏体化温度的升高,磨球的洛氏硬度呈现升高而后降低的趋势,淬火温度为 950°C 时硬度最高,为 60.98 HRC,与产品磨球的洛氏硬度 59.5 HRC 相比提高了 2.5%,淬火温度过高或过低均导致磨球的硬度不足,低于产品磨球的硬度;随着温度的提高,磨球冲击功呈连续下降趋势,从 850°C 的 6.72 J 降低到 1000°C 的 4.45 J,但经热处理实验后的试样,其冲击功普遍高于厂家产品球冲击功,最低可实现 37.3% 的提升。综合考虑磨球硬度和韧性, 950°C 是较为理想的奥氏体化温度,选择此奥氏体化温度进行后续实验^[8]。

如图 2(b),当奥氏体化温度为 950°C 时,随着奥氏体化保温时间由 1 h 延长至 4 h,磨球洛氏硬度

呈整体上升趋势,中心硬度从 60.25 HRC 提高至 61.00 HRC,磨球的冲击功随着保温时间的延长呈连续上升后保持的趋势,在保温 3~4 h 时,冲击功最高为 5.35 J;随着保温时间由 4 h 进一步延长至 5 h,磨球的硬度和冲击功均略有下降。并且,当奥氏体化火保温时间由 3 h 延长至 4 h,磨球的硬度和冲击功提升并不明显,从节能减排降成本方向考虑,奥氏体化保温时间选择 3 h 更为合适。

磨球的性能变化与显微组织特征密切相关,如图 3 所示,不同奥氏体化温度时磨球的显微组织均由马氏体、碳化物和奥氏体组成。由图 4 可知,随着奥氏体化温度的升高,合金元素的扩散速度加快,溶解到奥氏体中的 Cr、C 等合金元素的含量增多,淬火后作为合金基体的马氏体中的合金元素增多,马氏体硬度提高,基体组织的硬度增加,磨球的洛氏硬度随之增加。从形态上看,随着奥氏体化温度的升高,碳化物的形态和分布得到一定改善,长片状碳化物逐渐呈现短棒状、碎块状和菊花状,碳化物的细化亦有利于硬度的提高。由图 3(e)~(h)可知,随着奥氏体化温度的升高,残余奥氏体含量增加:当奥氏体化温度过高时($950 \sim 1000^\circ\text{C}$),溶入奥氏体中的碳化物数量增多,奥氏体中合金元素的含量较高,提高了奥氏体的稳定性,越多的一次碳化物溶解进奥氏体中,淬火后组织中的残余奥氏体占比增加,一次碳化物占比减少,硬度降低;同时,铸态奥氏体过饱和和溶入的碳及合金元素,在热力学上处于不稳定状态,在淬火过程中以二次碳化物的形式析出,但当奥氏体化温度过高时,碳和合金元素的溶解加剧,使得二次碳化物重新溶入到基体之中,导致析出的二次碳化物减少,奥氏体稳定化程度增加, M_s 降低,碳化物减少,残余奥氏体量增多,马氏体量减少,洛氏硬

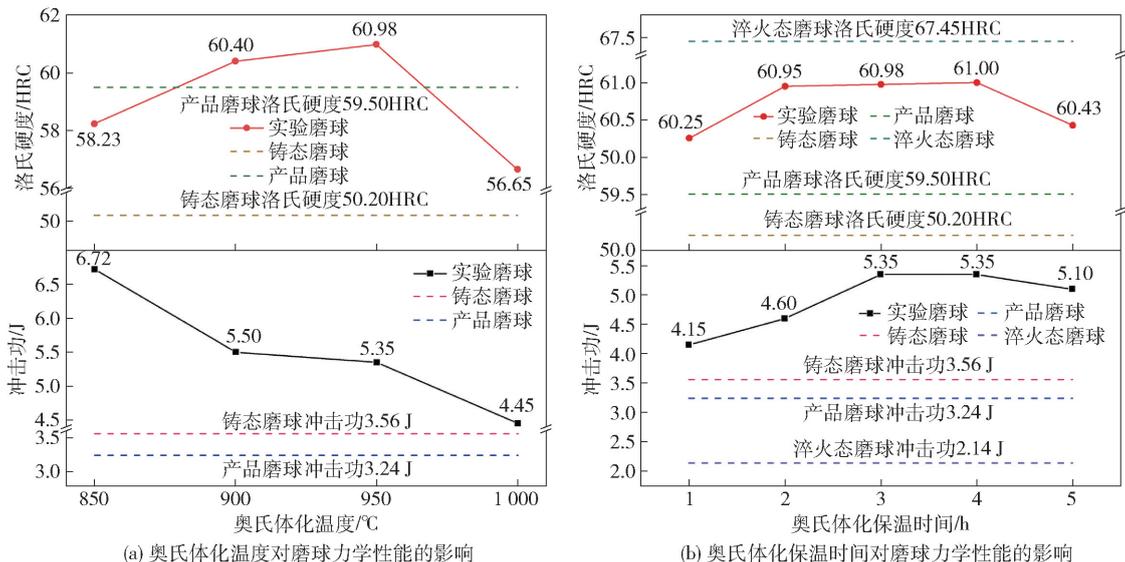


图 2 不同淬火条件下磨球的力学性能

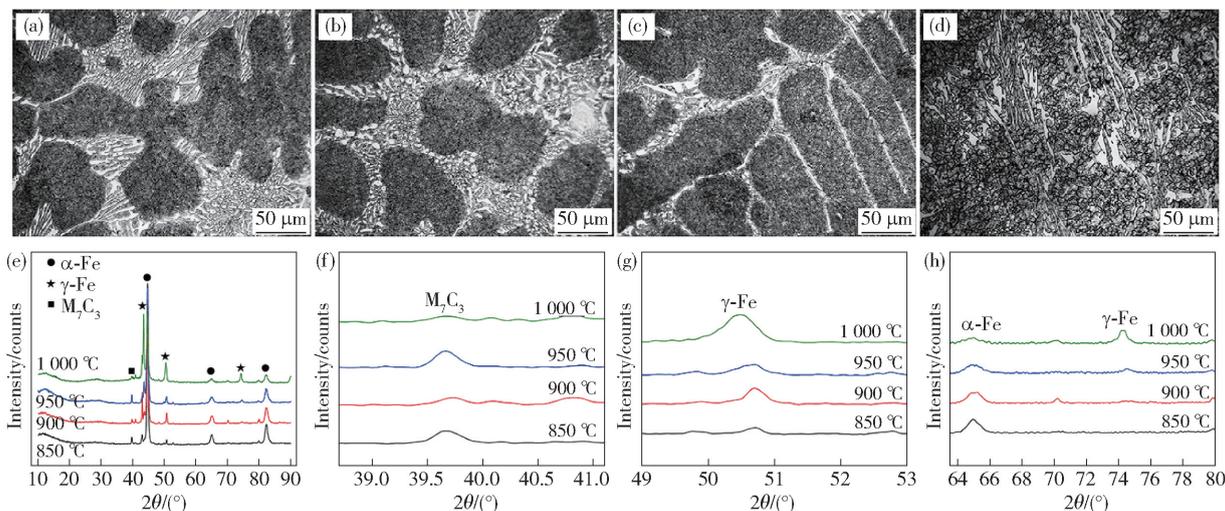


图 3 不同奥氏体化温度下磨球的显微组织及物相组成

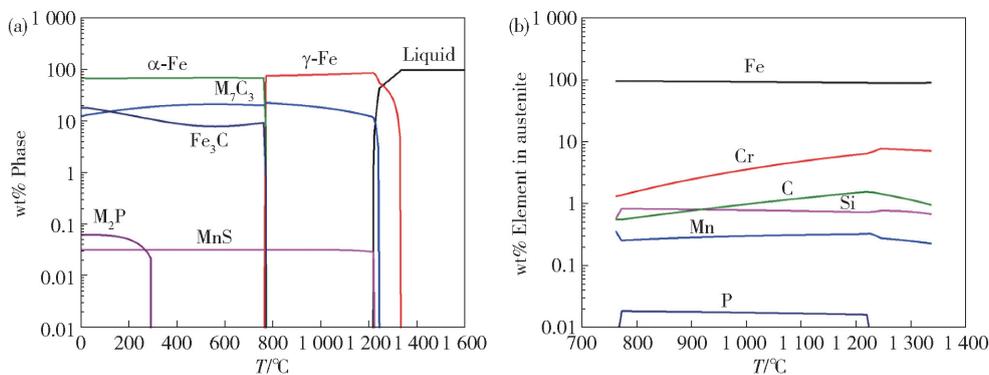
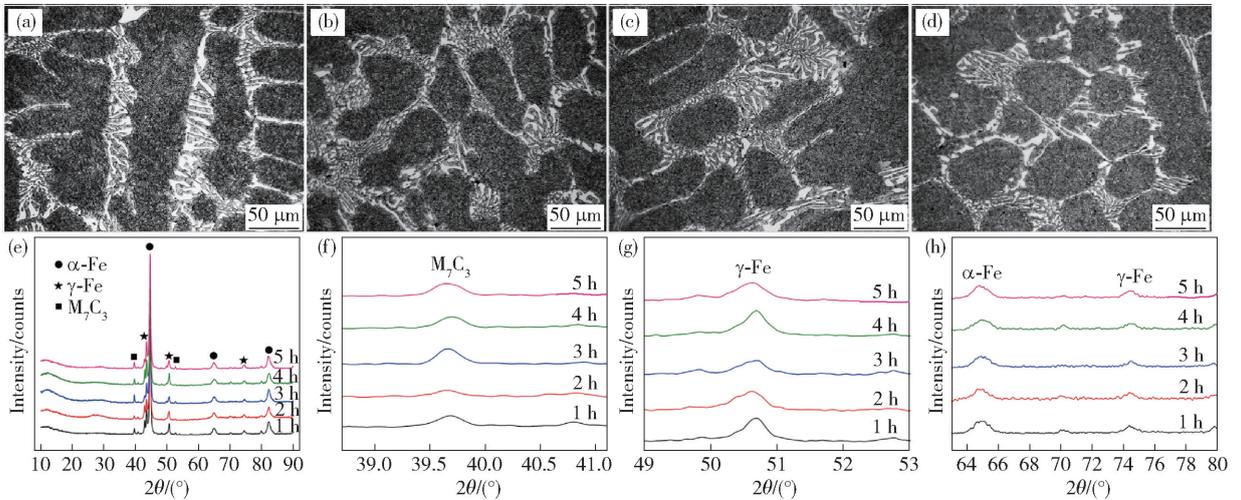


图 4 实验磨球的 (a) 平衡相组成和 (b) 奥氏体的元素组成变化

度值降低。因此,随着奥氏体化温度的升高,磨球的洛氏硬度因组织中合金元素含量的变化、碳化物的形貌转变以及物相组成的变化呈现先升高而后降低的现象,磨球的冲击韧性由于显微组织粗化而降低。

不同奥氏体化保温时间时磨球的显微组织仍以马氏体、碳化物和奥氏体为主,如图 5 所示,与奥氏体化温度相比,不同奥氏体化保温时间下磨球的显微形貌变化不大,因而磨球的洛氏硬度仅

在 60 ~ 61 HRC 较小范围内波动,当保温时间为 3 h 时,组织中的 M_7C_3 碳化物含量最多而 γ 奥氏体占比含量最少,其洛氏硬度亦最高,而继续延长保温时间,由于碳化物含量的减少,洛氏硬度反而有下降趋势,冲击功同样随着磨球组织的粗大略有下降,综合性能结果和组织特征,3 h 为较为适宜的奥氏体化保温时间。

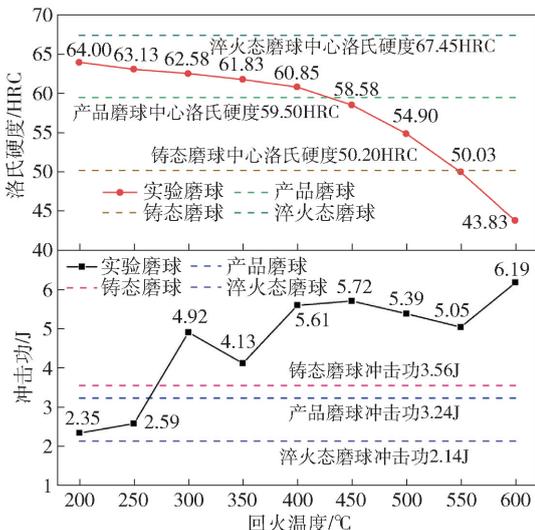


(a) 1 h; (b) 2 h; (c) 4 h; (d) 5 h; (e) ~ (h) XRD 能谱图
图 5 不同奥氏体化保温时间下磨球的显微组织及物相组成

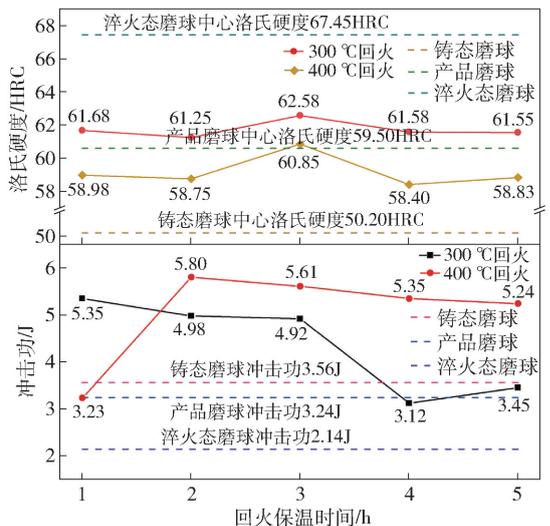
2.2 回火条件对磨球组织和性能的影响

以 950 °C 保温 3 h 作为实验的淬火条件,探索回火条件的优化提升磨球性能的较佳条件,其结果如图 6 所示。随着回火温度从 200 °C 提高到

600 °C, 磨球的硬度呈连续下降趋势,由 64 HRC 降低到 43.83 HRC。不同回火温度的磨球洛氏硬度均小于淬火态磨球洛氏硬度,当回火温度 ≥ 550 °C 时,实验磨球洛氏硬度小于铸态磨球洛氏硬度,当回火



(a) 回火温度对磨球力学性能的影响



(b) 回火保温时间对磨球性能的影响

图 6 不同回火条件下磨球的力学性能

温度 $\geq 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,磨球中心硬度 $< 60\text{ HRC}$,从磨球硬度控制来看,回火温度应 $\leq 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。此外,在 $200\sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的回火温度区间内,磨球的硬度下降趋势较为平缓,而在回火温度 $\geq 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,硬度下降显著。随着回火温度的升高,冲击功呈波动性上升趋势,在回火温度为 $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时存在冲击韧性下降的情况,即低温回火脆性和高温回火脆性现象,应避免在此两种温度下回火,当回火温度 $\geq 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,实验磨球的冲击韧性均可优于产品磨球水平,尤其是当回火温度为 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,磨球中心洛氏硬度为 62.58 HRC ,冲击功为 4.92 J ,当回火温度为 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,磨球中心洛氏硬度为 60.85 HRC ,冲击功为 5.61 J ,两种回火温度下的实验磨球均具备优于产品磨球的较佳的强韧匹配。

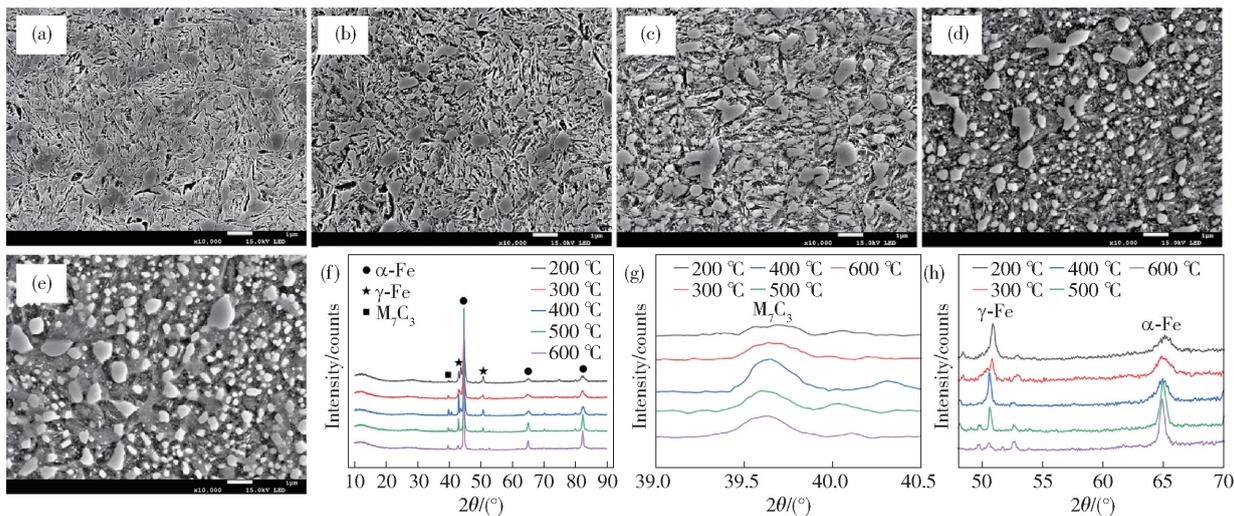
如图6(b),在 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的回火温度下,随着回火保温时间由 1 h 延长至 5 h ,磨球的洛氏硬度均先上升后下降,尤其是当 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 回火保温 3 h 时,磨球洛氏硬度为 62.58 HRC ,冲击功为 4.92 J ,相比产品磨球分别提高了 5.2% 和 51.9% ,具备优良的强韧性匹配。当回火温度为 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,仅当回火保温时间为 3 h 时,洛氏硬度可超过成品磨球水平,但提升并不明显,且在其他保温时间下,磨球硬度均无法达到成品磨球硬度水平,存在因控温波动导致产品性能无法提高的风险,不宜选用 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 作为回火温度。并且对比图6(a)和(b)可知,回火温度对磨球性能的影响比回火保温时间更为显著,应

着重控制。

不同回火条件下磨球的组织特征如图7和图8所示,磨球的组织仍由马氏体、碳化物和残余奥氏体组成。随着回火温度的提高,基体组织逐渐发生马氏体的分解、残余奥氏体的转变、碳化物转变及聚集长大过程,尤其是当回火温度为 $\geq 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,碳化物呈现明显的聚集长大并球化趋势,使得磨球的硬度下降明显,冲击韧性则随着回火温度的升高带来的内应力的消除而有所提高。不同回火保温时间下磨球的显微组织并无明显差异,均为基体组织上弥散分布着 M_7C_3 型粒状碳化物;基体中的合金元素含量随着碳化物的析出而降低,导致磨球硬度降低而韧性提高;回火过程中的二次碳化物的析出有利于磨球强韧性的增加,但长时间保温碳化物将聚集长大而不利于性能的提高;残余奥氏体分解而产生的 γ 相占比变化对磨球的硬度和韧性产生影响,多因素的共同作用使得磨球的洛氏硬度和冲击韧性呈现小幅度变化。综合磨球性能、显微组织特征来看, $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 回火保温 3 h 为较佳的回火条件。

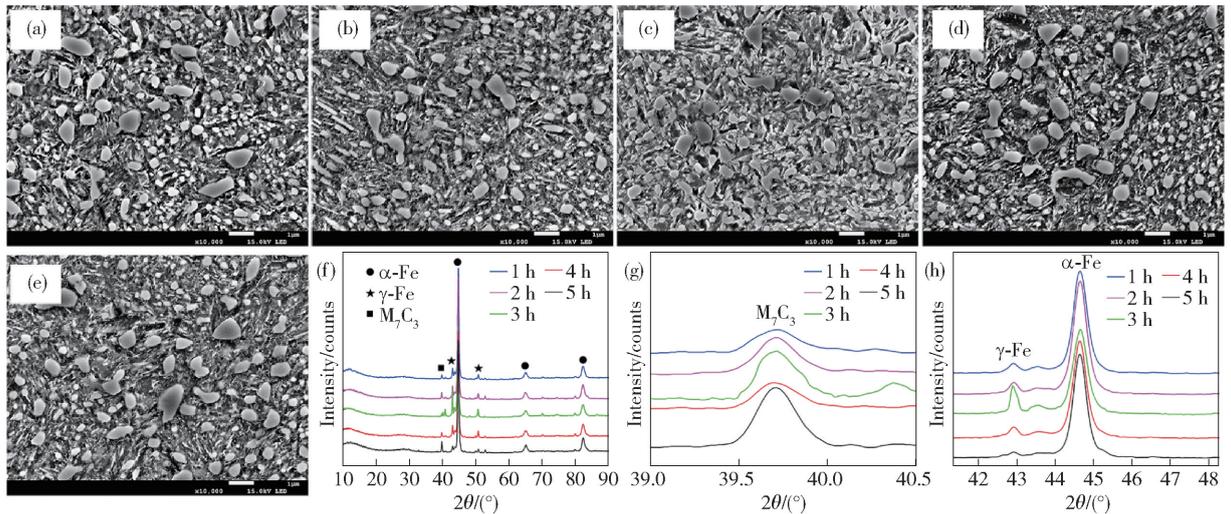
3 结论

本章利用马弗炉,结合金相显微组织形貌观察、力学性能测试、XRD能谱分析等多种手段,探索了奥氏体化温度、奥氏体化保温时间、回火温度和回火保温时间对ZQCr12高铬磨球洛氏硬度和冲击韧性的影响,明确了该磨球力学性能优化的关键参数,得



(a) $200\text{ }^{\circ}\text{C}$; (b) $300\text{ }^{\circ}\text{C}$; (c) $400\text{ }^{\circ}\text{C}$; (d) $500\text{ }^{\circ}\text{C}$; (e) $600\text{ }^{\circ}\text{C}$; (f) ~ (h) XRD 能谱图

图7 不同回火温度下磨球的显微组织及物相组成



(a) 1 h; (b) 2 h; (c) 3 h; (d) 4 h; (e) 5 h; (f) ~ (h) XRD 能谱图

图 8 当回火温度为 300 °C 时,不同回火保温时间下磨球的显微组织及物相组成

到以下主要结论。

1) 随着奥氏体化温度从 850 °C 升至 1 000 °C, 磨球的洛氏硬度先升高后降低, 冲击韧性不断下降; 随着奥氏体化保温时间的延长, 磨球的硬度和韧性均呈先升高而后降低趋势, 但变化量较少; 随着回火温度的升高, 磨球的硬度连续下降, 冲击韧性波动性上升; 随着回火保温时间的延长, 磨球的硬度和韧性均在一定范围内波动。

2) 对于实验磨球较为理想的热处理条件为: 以淬火油为冷却介质, 奥氏体化温度为 950 °C、奥氏体化保温时间为 3 h, 回火温度为 300 °C、回火保温时间为 3 h, 所得磨球洛氏硬度为 62.58 HRC, 冲击功为 4.92 J, 相比产品磨球可分别提高 5.2% 和 51.9%。

3) 不同热处理条件下磨球的显微组织均由马氏体、碳化物和残余奥氏体组成, 马氏体基体的组织特征、碳化物的形态和分布、残余奥氏体的占比共同

影响磨球洛氏硬度和冲击韧性的实现。

[参考文献]

- [1] 中研普华研究院. 2022—2027 年耐磨钢球行业市场深度分析与投资风险预测报告[R]. 2022.
- [2] 陈勇. 抗磨铸铁磨球强韧化热处理工艺的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.
- [3] 鲍万臣, 李伟, 李刚, 等. 探讨我国金属矿山球磨机磨球的应用现状及选材[J]. 世界有色金属, 2021(14): 42-43.
- [4] 高玉和, 张天文. 矿用磨球种类及性能研究现状[J]. 江西冶金, 2021, 41(3): 62-68.
- [5] 杨跃辉, 张晓娟, 褚祥治, 等. 合金元素对高 Cr 铸铁组织和性能的影响[J]. 唐山学院学报, 2013, 26(6): 26-29.
- [6] GB/T 230.1—2018, 金属材料 洛氏硬度试验 第 1 部分: 试验方法[S].
- [7] GB/T 229—2020, 金属材料 夏比摆锤冲击试验方法[S].
- [8] 陈曦, 刘君, 陈学刚, 等. 奥氏体化温度和合金成分对典型磨矿介质相变动力学的影响[J]. 有色设备, 2022, 36(6): 55-61, 66.

Influence of Heat Treatment Parameters on Mechanical Properties of Grinding Ball for Mines

CHEN Xi, DAI Wenbin, QI Yongfeng, WANG Shuxiao, CHEN Xuegang

Abstract: In order to further improve the Rockwell hardness and impact toughness of the grinding ball for mines, the mechanical properties, microstructure and phase characteristics of the grinding ball under different heat treatment conditions were studied. The results show that the microstructure of the grinding ball under different heat treatment conditions is composed of martensite, carbide and retained austenite. The

microstructure characteristics of the matrix, the shape and distribution of carbide and the proportion of retained austenite all affect the performance of the grinding ball. With the increase of austenitizing temperature, the hardness increased first and then decreased, while the impact toughness decreased continuously. With the extension of austenitized holding time, both hardness and impact toughness increased first and then decreased. The hardness decreased continuously and the impact toughness fluctuation increased as the tempering temperature increased. With the extension of tempering holding time, the hardness does not change obviously, while the impact toughness decreased. For experimental grinding balls, the appropriate heat treatment process is to hold at 950 °C for 3 h, and then quickly quenched in oil, and then tempered at 300 °C for 3 h. Under this condition, the Rockwell hardness of the grinding ball is 62.58 HRC and the impact toughness is 4.92 J, which can be increased by 5.2% and 51.9% compared with the product grinding ball, respectively.

Key words: grinding ball; heat treatment; Rockwell hardness; impact toughness; microstructure ▲

敬告读者

为了加快稿件处理速度,缩短稿件出版周期,方便广大作者投稿及查询稿件处理情况。本刊开通由中国知网提供的“腾云”网络采编系统,作者投稿请注册并登录本刊主页上的“作者投稿系统”进行相关操作,网址 <https://yssb.cbpt.cnki.net/>。注册登录后可以向本刊投稿并查询稿件处理状态。请勿重复注册,否则可能导致您的信息查询不完整。

本刊文章数字版可在中国知网(<http://www.cnki.net>)、万方数据知识服务平台(<https://www.wanfang-data.com.cn/>)、维普网(<http://www.cqvip.com/>)下载使用。本刊从未委托任何单位或个人组稿或代收、代转稿件,作者咨询投稿事宜请拨打编辑部办公电话 010-63936591 联系。

《有色设备》编辑部