

Study on the Microstructure and Properties of Medium Manganese Martensitic Cast Iron under Different Heat Treatment

Yushi Yang¹, Ke Zhu¹, Chao Ling¹, Lingyou Wen¹, Siyong Zhao², Jianmin Zeng¹

¹College of Resource, Environmental and Materials, Guangxi University, Nanning Guangxi

²Guangxi Changcheng Mechanical Co., Ltd., Hezhou Guangxi

Email: yangyushimm@163.com

Received: Aug. 3rd, 2020; accepted: Aug. 17th, 2020; published: Aug. 24th, 2020

Abstract

In this experiment, the medium manganese cast iron produced by the combination of red mud and manganese ore from Pingguo Bayer process was used as raw material, and then melted and cut into samples, the manganese content is about 5.36%. The hardness and wear resistance of medium manganese cast iron were studied after quenching at 800°C, 850°C and 900°C and tempering at 200°C, 400°C and 600°C respectively. The results show that the best heat treatment process of medium manganese cast iron is 850°C quenching and 200°C tempering. After heat treatment, the microstructure of the sample is mainly tempered martensite, with bainite, retained austenite and a small amount of carbide. It has low hardness and is easy to process. It has small weight loss and good wear resistance after wear. At the same quenching temperature, with the increase of tempering temperature, the hardness and wear resistance of the sample decrease. The change of quenching temperature has little effect on the mechanical properties of the samples.

Keywords

Medium Manganese Cast Iron, Heat Treatment, Property, Structure

中锰马氏体铸铁在不同热处理下组织与性能研究

杨宇诗¹, 朱可¹, 凌超¹, 文灵有¹, 赵四勇², 曾建民¹

¹广西大学资源环境与材料学院, 广西 南宁

²广西长城机械有限公司, 广西 贺州
Email: yangyushimm@163.com

收稿日期: 2020年8月3日; 录用日期: 2020年8月17日; 发布日期: 2020年8月24日

摘要

本实验以平果拜耳法赤泥和锰矿结合提炼还原出的中锰铸铁作为原料, 分别对试样使用不同温度进行淬火, 并配合低中高温回火的热处理后观察其组织, 研究中锰铸铁的硬度和耐磨性。实验结果表明中锰铸铁最佳热处理工艺为850℃淬火200℃回火, 热处理后通过显微镜观察得到以回火马氏体为主, 同时存在贝氏体、残余奥氏体以及少量碳化物的试样金相组织, 其硬度较低易于加工, 磨损后失重量小, 耐磨性好。在相同淬火温度下, 随着回火温度的增加, 试样的硬度降低, 耐磨性能减弱。淬火温度的变化对试样的力学性能的影响相对较小。

关键词

中锰铸铁, 热处理, 性能, 组织

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

赤泥是在氧化铝生产过程中产生的一种碱性不溶性残渣, 含有大量可利用的氧化物和金属元素。尤其是铁元素, 具有很高的二次利用价值[1]。从赤泥中还原制备铁合金是拜耳法赤泥综合回收利用的一条重要途径, 收到了国内外学者的广泛研究。中锰铁合金通常是指锰含量为5%~9%, 硅含量为3%~5%的铁合金。作为近年来应用较为广泛的合金一种耐磨材料, 常以中锰铸铁形式应用在生产生活中。中锰铸铁具有优秀的力学性能和更理想的生产成本, 其结构特点是具有铁素体和奥氏体或贝氏体/马氏体和奥氏体组成的显微组织[2]。尤其是在低温下, 中锰铁合金因其高强度、高塑性和冲击韧性的优良组合而备受关注, 在汽车、海洋平台、桥梁等领域具有潜在的应用前景[3]。向拜耳法赤泥还原所得的铁合金中添加一定量的锰, 可以制备得到中锰铁合金。但是由于赤泥直接还原所得的铁合金中成分比较复杂, 组织性能不稳定, 制备所得的中锰铁合金不能直接应用于工业生产当中, 需要进行适当的热处理工艺, 改善中锰铁合金的组织 and 性能, 使其达到使用要求。若制备所得的中锰铸铁能够达到一定的使用性能, 替代传统的中锰耐磨铸铁, 就能大大降低生产成本, 提高经济效益, 具有十分重要的研究意义。

本实验采用以平果拜耳法赤泥还原出的铁合金为原料, 制备得到了中锰铸铁, 观察、对比以及研究经过了不同热处理工艺对中锰铸铁试样组织和性能的影响, 探究中锰铸铁性能最优的热处理方案。

2. 实验方法

2.1. 试样制备与热处理

将广西平果铝厂拜耳法赤泥还原所得的铁合金为原料, 加入锰元素得到中锰铸铁原料。破碎后通

过 GP-25 高频感应炉进行熔炼，感应炉振荡功率为 25 KW，振荡频率为 30~60 KHz，铁水出炉温度大约在 1500℃。熔炼后将铁水浇注成金属锭，将金属锭分组进行热处理。热处理后待完全冷却至室温，将金属锭切割成 10 mm × 10 mm × 10 mm 金相试样以及 $\phi 4 \times 30$ mm 的磨损试样，并对铸态试样进行成分分析。

中锰铸铁试样编号以及热处理工艺见表 1，采用台式电加热马弗炉进行淬火和回火。其中淬火温度取 800℃、850℃、900℃，保温 2 h，水冷；回火温度取 200℃、400℃、600℃，保温 2 h，水冷。

Table 1. Heat treatment process

表 1. 热处理工艺

编号	热处理工艺
1	800℃ 2 h 水冷 + 200℃ 2 h 水冷
2	800℃ 2 h 水冷 + 200℃ 2 h 水冷
3	800℃ 2 h 水冷 + 600℃ 2 h 水冷
4	850℃ 2 h 水冷 + 200℃ 2 h 水冷
5	850℃ 2 h 水冷 + 400℃ 2 h 水冷
6	850℃ 2 h 水冷 + 600℃ 2 h 水冷
7	900℃ 2 h 水冷 + 200℃ 2 h 水冷
8	900℃ 2 h 水冷 + 400℃ 2 h 水冷
9	900℃ 2 h 水冷 + 600℃ 2 h 水冷
10	铸态

2.2. 性能测试和金相组织观察

对热处理各组试样及铸态金相试样制备，依次使用 180 目、400 目、600 目、800 目、1000 目及 1500 目的砂纸对试样进行磨光，再使用抛光机将试样抛光。用 4% 硝酸酒精对试样表面进行腐蚀，腐蚀剂停留 8 s~10 s，观察到试样表面发生变色后立即冲洗。在 LeicaDM2700P 偏光式光学显微镜下观察各组试样的金相组织并对其进行分析。

对试样分组后分别进行不同温度组合的淬火 + 回火热处理，对不同热处理温度下中锰铸铁试样的硬度变化进行研究和分析。取进行组织观察后的金相试样再次抛光后露出新鲜表面，使用 HWDM-3 显微硬度测试计，在试样表面沿对角线方向随机取 10 个点进行硬度测试，载荷 F 为 9.807 N，并换算成洛氏硬度，取平均值，得到各组试样硬度值。

使用 ML-100 型磨粒磨损试验机对已经进行过热处理、规格为 $\phi 4 \times 30$ mm 的磨损试样进行耐磨性测试，试验原理如图 1 所示。首先将试样进行超声波清洗并干燥后，使用 1000 目金相砂纸进行预磨，载荷为 10 N，使试样露出新鲜表面，使用精度为 0.1 mg 的分析天平称重。使用 180 目金相砂纸，载荷为 15 N 进行耐磨性实验，对磨损后的试样再次称重，磨损率可通过下列式子求出：

$$\delta = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \quad (1)$$

式中： δ 为试样磨损率，%； W_1 为试样磨损前的质量，mg； W_2 为试样磨损后的质量，mg。

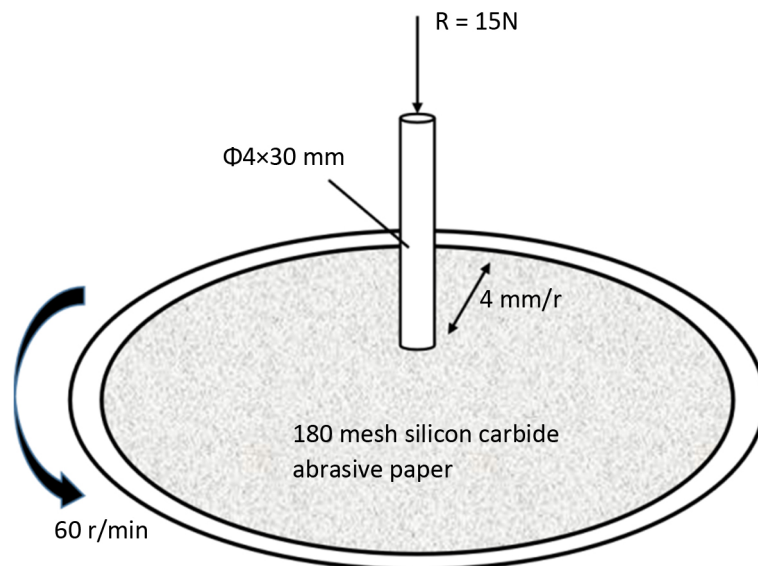


Figure 1. Principle of abrasive wear test

图 1. 磨粒磨损试验原理图

3. 结果分析

3.1. 铸态中锰铸铁成分分析

通过 ARL iSpark 8860 型号直读光谱仪定性分析铸态中锰铸铁成分, 在铸态试样上的任意一点激发 3 次后得到的数据取平均值即可得到试样成分如表 2。

Table 2. Composition of medium manganese cast iron as cast (mass fraction, %)

表 2. 铸态中锰铸铁成分(质量分数, %)

C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	V	Ti
3.37	5.36	4.79	0.38	0.01	0.86	0.70	0.15	0.29

通过对成分的分析可以观察到实验试样中 Mn、Si 含量较高, 是主要的合金元素。Mn 的存在有利于提高淬透性, 降低 A1 温度得到细珠光体或马氏体, 促进马氏体的产生, 锰含量达到 $W_{Mn} = 5\% \sim 7\%$ 时, 能够形成马氏体基体[4]。Si 是抑制中锰铸铁白口倾向的强力元素, 能够降低固溶体中的碳浓度, 因而降低奥氏体稳定性, 促进奥氏体的分解[5]。试样中 Si 的含量较高, 有利于提高强度和韧性, 但在一定程度上降低了试样耐磨性。同时, C 的含量直接影响奥氏体的稳定性, 降低 Ms 温度, 使得以低碳为特征的残余奥氏体在塑性变形过程中容易转换成马氏体[6]。微量的 Cr 有利于增强抗拉强度, 起到固溶强化的效果, 但同时也使断口的脆性增大。除了 Mn、Si 等主要合金元素外, 同时也存在 Ti、Ni 等微量元素, 由结果可见赤泥还原所得到的铁合金中成分复杂, 正是因为铁合金中成分复杂, 其热处理工艺、机械性能的影响更值得深入的研究和探讨。

3.2. 热处理对硬度的影响

经过不同热处理的各组试样进行硬度测试, 得到的结果如图 2。

对于中锰合金来说, 亚稳残余奥氏体是主要相之一, 是高强度和高塑性结合的原因, 在相变过程中, 这一相逐步转变为马氏体, 提高了试样的强度和塑性[7] [8]。

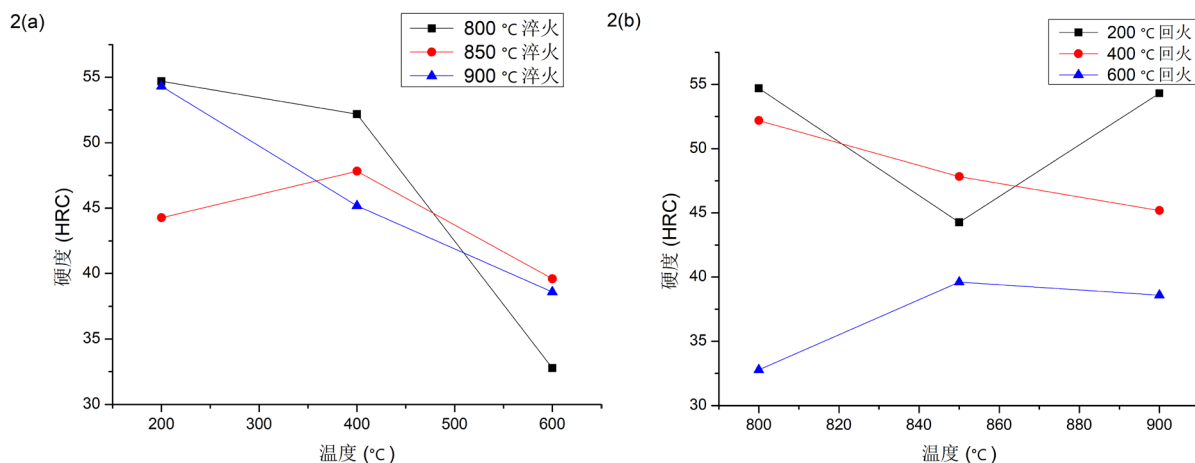


Figure 2. (a) Line chart of hardness changing with quenching temperature at the same tempering temperature; (b) Line chart of hardness changing with tempering temperature at the same quenching temperature

图 2. (a) 相同回火温度下硬度随淬火温度变化而变化的折线图; (b) 相同淬火温度下硬度随回火温度变化而变化的折线图

淬火后获得马氏体和贝氏体组织等不平衡组织,使得试样的硬度相对于铸态提高,随着淬火温度的提高,奥氏体的稳定性增加,使得试样的淬透性得到提高,但过高的淬火温度,也有可能使得奥氏体晶粒粗大,冷却后存在粗大的马氏体,残余奥氏体含量增加,使得硬度略有降低。通过图 2(a)观察到,在相同淬火温度下,各组试样的硬度随着回火温度的增加,曲线整体成降低趋势。回火后马氏体分解,在同样的淬火温度下,回火温度的逐渐提高,使得过饱和的碳从 α -Fe 中脱溶并形成碳化物,逐渐降低了试样的硬度。通过对两组图线的对比可以观察到,在相同的淬火温度下,试样硬度值随回火温度变化而变化的折线斜率相比于图 2(b)相同回火温度下淬火温度的变化对试样硬度值影响的折线更大更陡,即回火温度的变化对试样硬度的影响程度更大。

3.3. 热处理对耐磨性能的影响

不同热处理工艺后各组试样进行耐磨性实验,得到结果如图 3 所示。

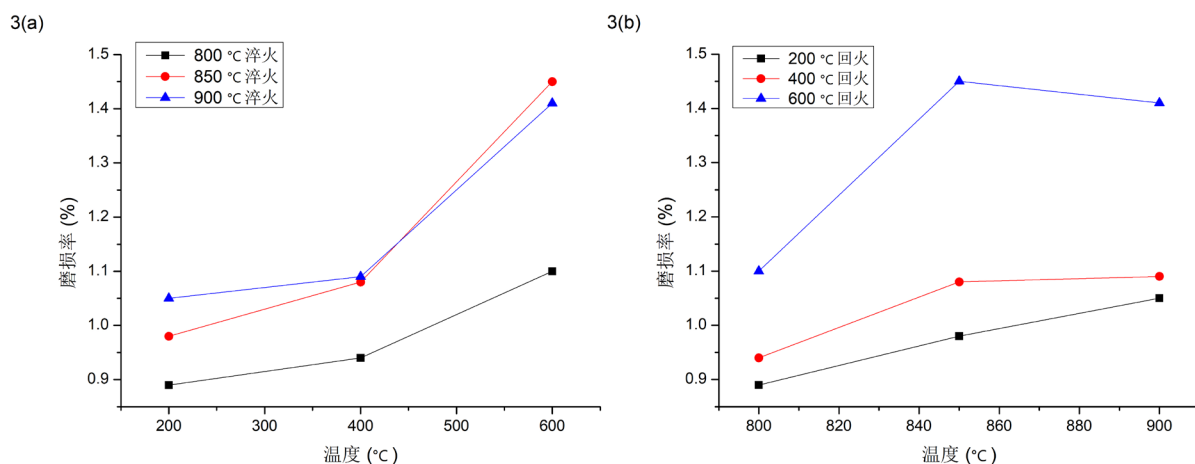


Figure 3. (a) Line chart of wear rate changing with quenching temperature at the same tempering temperature; (b) Line chart of wear rate changing with tempering temperature at the same quenching temperature

图 3. (a) 相同回火温度下磨损率随淬火温度变化而变化的折线图; (b) 相同淬火温度下磨损率随回火温度变化而变化的折线图

从图表中看出,在相同回火温度下,随着淬火温度的升高,磨损前后失重量越大,磨损率逐渐增大,耐磨性越差;而在相同淬火温度下,随着回火温度的升高,磨损前后失重量越大,耐磨性也越差,这是由于淬火后回火将发生残余奥氏体的分解,并且随着回火温度的升高,试样碳化物减少,硬度降低,耐磨性降低。通过对比,900℃淬火 600℃回火和 850℃淬火 600℃回火耐磨性最差,磨损失重量最高。并且通过两组折线图的对比观察可以得到,图 3(a)中折线的斜率比图 3(b)中折线的斜率更大,这表明回火温度对试样耐磨性的影响略大于淬火温度对试样耐磨性的影响。

为探究磨损量与硬度之间的相关性,结合热处理后试样的硬度数据可以观察到,在淬火温度相同这一条件下,耐磨性变化趋势和硬度变化趋势相同,硬度越大失重量越小,耐磨性越好。相比铸态试样,热处理后的试样磨损率均有升高,这表明磨损量与硬度显著相关。

磨损性能属于金属材料的重要力学性能之一,采用磨粒磨损形式对试样进行耐磨性试验,以探究试样的磨损性能。材料的磨粒磨损可分为切削磨损和形变磨损两方面构成[4],磨粒磨损的机制主要有微切削、微断裂、微疲劳以及挤压剥落[9]。磨粒磨损与试样相对硬度、载荷以及试样的几何特性等相关,但热处理前后,试样耐磨性和硬度的相关性不同,对于热处理之后的试样,硬度对耐磨性的影响没有铸态试样明显[10]。结合图 2、图 3 可以观察到,铸态试样的硬度值相对经过热处理后试样总体的硬度值小,但磨损率最低,耐磨性能最好,可见在未经热处理的试样硬度对耐磨性影响较大。热处理后基体为回火马氏体和贝氏体,其硬度、韧性合理配合,故热处理后试样具有良好的综合性能。

3.4. 热处理对组织的影响

中锰铸铁铸铁中锰的含量较高,锰溶于高温奥氏体中能够使 C 曲线向右移动,在铸造条件下冷却速度大于临界冷却速度,使得组织中出现马氏体或贝氏体[11]。中锰铸铁铸态的硬度较高,然而冲击韧性较低,在直接使用铸态的情况下,容易造成断裂。通过不同的热处理工艺,可以对其组织和性能进行定向的演变和调控。淬火处理能够使铸态试样奥氏体化,并得到尽可能多的马氏体,为了获得不同的组织形貌和力学性能,配以不同温度的回火处理。回火处理可以使残余奥氏体转换为贝氏体,并且使马氏体转变为回火马氏体,从而提高试样的组织稳定性,降低硬度和强度、提高塑性,消除淬火内应力,从而改善试样的综合性能。

图 4(a)~(c)分别是试样经过 800℃、850℃以及 900℃淬火后 200℃回火处理得到的试样表明金相组织图。800℃淬火温度较低,图 4(a)可观察到碳化物未溶解于残余奥氏体中,呈分散的网状分布。随着淬火温度的逐渐提高,850℃淬火低温回火时由图 4(b)可以观察到,马氏体逐渐增加,而碳化物逐渐溶解,再配合 200℃低温回火获得以马氏体为主的回火马氏体、贝氏体以及残余奥氏体,此时未溶碳化物程细小网状分布。900℃淬火 200℃回火时,从图 4(c)可以观察到碳化物大部分溶解但仍有残留的未溶碳化物,此时碳化物呈块状分布,马氏体数量增加,组织为大量的马氏体、贝氏体以及部分残余奥氏体。

图 5(a)~(c)分别是 850℃淬火 + 不同温度回火热处理的金相组织图。从图 5(a)可以观察到,200℃的低温回火热处理后试样的组织为以马氏体为主的回火马氏体、贝氏体、少量奥氏体以及碳化物,回火使得奥氏体转变为贝氏体,而马氏体转变为回火马氏体。但碳化物含量较多,程网状分布,相比经过较高温回火处理的试样硬度较高、韧性较低。当回火温度逐渐升高,此时残余奥氏体逐渐分解,850℃淬火 400℃回火处理后如图 5(b)得到回火屈氏体,碳化物分解成细小的块状和少量网状,此时韧性进一步增加,而耐磨性有所下降。从图 5(c)观察到 850℃淬火 600℃高温回火处理后,得到回火索氏体,部分碳化物溶解,剩余碳化物聚集呈细小针状,连续性低对集体割裂作用小。因此在相同淬火温度下随着回火温度的升高,硬度和耐磨性下降。

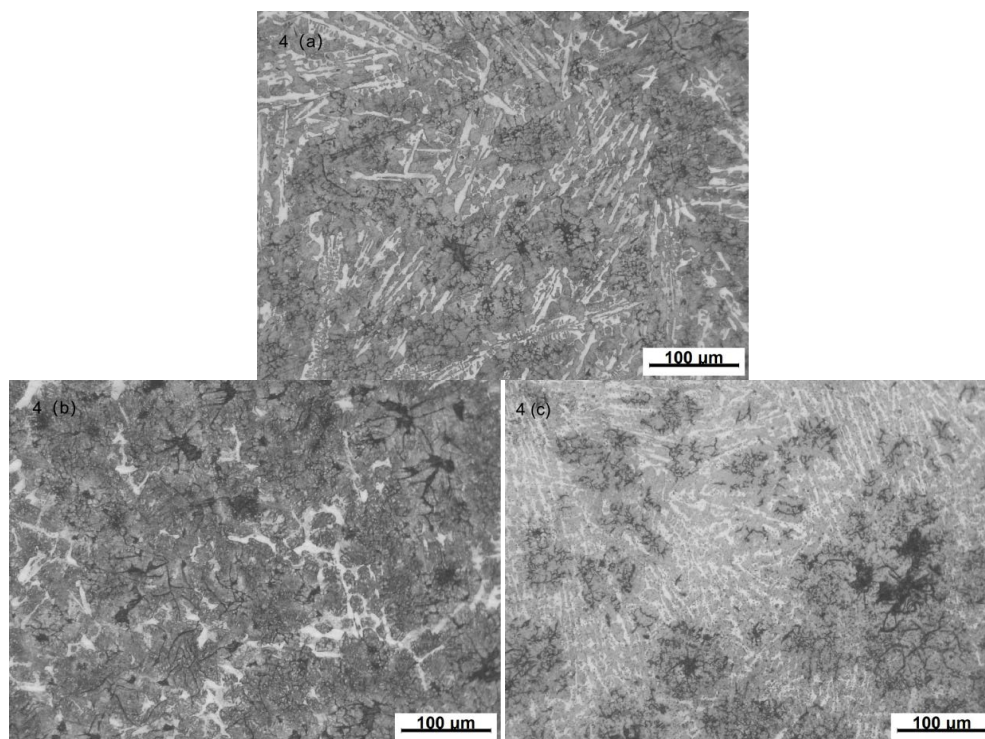


Figure 4. (a) 800°C quenching and 200°C tempering; (b) 850°C quenching and 200°C tempering; (c) 900°C quenching and 200°C tempering

图 4. (a) 800°C 淬火 200°C 回火; (b) 850°C 淬火 200°C 回火; (c) 900°C 淬火 200°C 回火

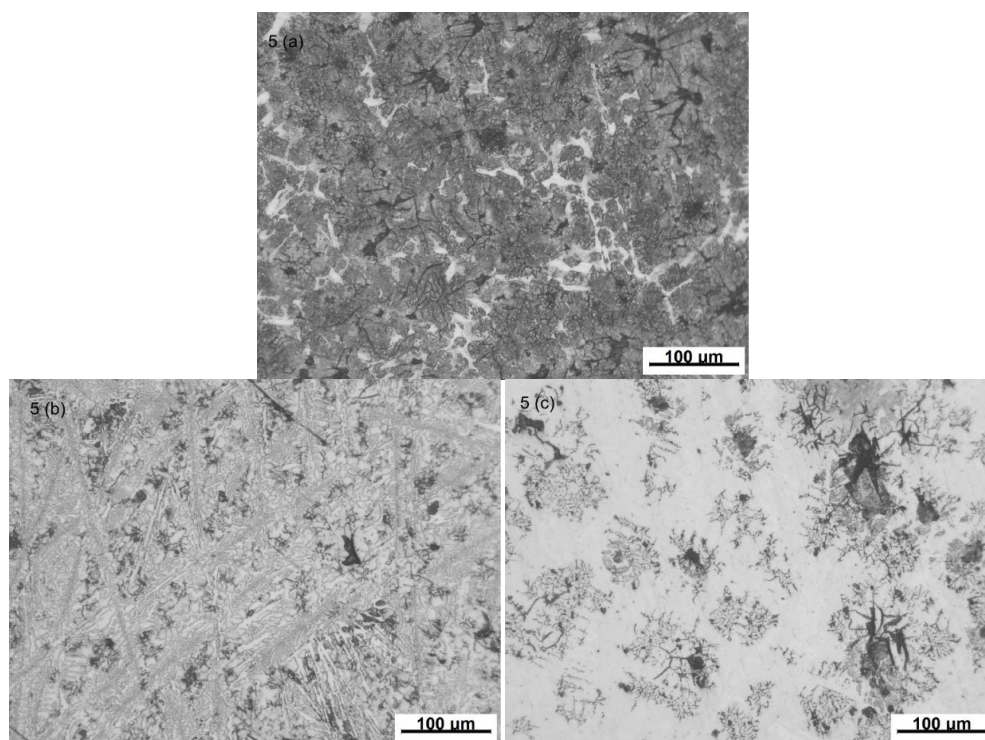


Figure 5. (a) 850°C quenching and 200°C tempering; (b) 850°C quenching and 400°C tempering; (c) 850°C quenching and 600°C tempering

图 5. (a) 850°C 低温回火; (b) 850°C 中温回火; (c) 850°C 高温回火

4. 结论

1) 经过不同热处理后的中锰铸铁试样硬度随回火温度的升高呈现降低的趋势。在相同的淬火条件下, 随着回火温度的升高, 硬度有所降低的同时, 试样在磨损实验中磨损失重量增大, 耐磨性降低。铸态试样的硬度值相比不同条件热处理后的试样硬度值高, 即热处理能够使试样硬度下降, 一定程度上提高了试样的可加工性和塑性。

2) 综合硬度及磨损失重量分析, 850℃淬火 200℃回火是最佳热处理温度, 热处理后, 其组织为回火马氏体、贝氏体、少量残余奥氏体以及呈网状分布的碳化物, 并且硬度和耐磨性适中。

3) 试样经过不同条件的热处理, 在光学显微镜下观察到的金相组织也有所不同, 即热处理对试样的组织有一定的影响。200℃低温回火后, 碳化物在试样的组织中呈分散的网状分布, 含碳量较多此时硬度较高。在淬火条件相同的情况下, 随着回火温度的提高, 碳化物逐渐分解为细小块状, 此时硬度和耐磨性逐渐降低。

基金项目

广西重大科技专项(桂科 AA18242001)。

参考文献

- [1] 朱军, 兰建凯. 赤泥的综合回收与利用[J]. 矿产保护与利用, 2008(2): 55-57.
- [2] Grajcar, A., Kilarski, A., Kozłowska, A., *et al.* (2019) Microstructure Evolution and Mechanical Stability of Retained Austenite in Thermomechanically Processed Medium-Mn Steel. *Materials*, **12**, 501. <https://doi.org/10.3390/ma12030501>
- [3] Yu, S., Du, L.X., Hu, J., *et al.* (2018) Effect of Hot Rolling Temperature on the Microstructure and Mechanical Properties of Ultra-Low Carbon Medium Manganese Steel. *Materials Science & Engineering A*, **731**, 149-155. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.06.020>
- [4] 李合非, 许斌, 刘念聪, 等. 中锰球墨铸铁热处理工艺的试验研究[J]. 农机化研究, 2001(2): 96-98.
- [5] 曲敬信, 芮争家, 左保华, 等. 中锰球墨铸铁组织与性能的研究[J]. 电力机械, 1984(6): 36-46.
- [6] Timokhina, I.B., Hodgson, P.D. and Pereloma, E.V. (2004) Effect of Microstructure on the Stability of Retained Austenite in Transformation-Induced-Plasticity Steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*, **35**, 2331-2341. <https://doi.org/10.1007/s11661-006-0213-9>
- [7] Grajcar, A., Kwaśny, W. and Zalecki, W. (2015) Microstructure-Property Relationships in TRIP Aided Medium-C Bainitic Steel with Lamellar Retained Austenite. *Materials Science & Technology*, **31**, 781-794. <https://doi.org/10.1179/1743284714Y.0000000742>
- [8] Morawiec, M., Grajcar, A., Zalecki, W., *et al.* (2020) Dilatometric Study of Phase Transformations in 5 Mn Steel Subjected to Different Heat Treatments. *Materials*, **13**, 958. <https://doi.org/10.3390/ma13040958>
- [9] 温诗铸. 摩擦学原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1990.
- [10] 黄智文. 谈谈磨粒磨损[J]. 表面技术, 2000(4): 34-36.
- [11] 赵爱民, 王晓虎, 张丽娟, 钟雪友. 中锰球铁热处理工艺研究[J]. 现代铸铁, 2002(2): 16-18.