

高碳中铬耐磨合金钢热处理后的组织及磨料磨损性能

宁嘉沛^{1,2}, 郑开宏², 周宏明¹, 王海艳², 龙 骏²

(1. 中南大学材料科学与工程学院, 湖南长沙 410083; 2. 广东省材料与加工研究所, 广东广州 510651)

摘要: 研究了不同淬火温度对中铬合金钢微观组织及力学性能的影响, 测试了不同碳含量的中铬合金钢热处理后的力学性能及耐磨性能, 并分析其磨损机理。结果表明, 在860~1 020 °C温度范围, 淬火温度提高会使晶粒长大且使碳化物逐渐溶解, 其硬度在碳化物溶解后显著降低, 而冲击韧性随着淬火温度升高先降后增。含1.0% C的高碳中铬耐磨合金钢经过1 000 °C退火、980 °C淬火、220 °C回火热处理后, 其微观组织以片状马氏体为主, 有大量M₇C₃型碳化物小颗粒均匀分布, 有较高的冲击韧性和优异的磨料磨损性能。

关键词: 耐磨合金钢; 淬火温度; 磨料磨损; 马氏体; M₇C₃

作者简介:

宁嘉沛 (1994-), 男, 硕士生, 主要从事耐磨材料的研究。电话: 18508494396, E-mail: 352967248@qq.com

通讯作者:

郑开宏, 男, 教授级高级工程师, 博士。电话: 13602721690, E-mail: 13602721690@163.com

中图分类号: TG172

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2020)02-0135-07

基金项目:

广东省科学院实施创新驱动发展能力建设专项(2017GDASCX-0117, 2018GDASCX-0117); 广州市对外合作项目(201807010085); 广东省科技计划项目(2018dr013)。

收稿日期:

2019-09-02 收到初稿,
2019-10-30 收到修订稿。

合金钢已有一百多年的应用历史, 其根据添加的合金元素不同, 可获得不同的力学性能和磨损性能, 多品种、高性能的合金钢是社会和经济发展的重要材料^[1-3]。

耐磨合金钢是用于不同磨损工况下的特殊性能钢, 我国已发展出许多耐磨钢种^[4], 如奥氏体锰钢^[5-6]、中铬钢^[7]、高碳马氏体钢^[8-9]等。中铬钢因具有良好的淬透性, 空淬后回火即可表现出较高的耐磨性能。目前, 中铬钢主要以低、中碳为主, 研究表明适量增加中铬钢中碳含量, 可以进一步提高其淬火后硬度, 增加耐磨性能^[10-12]。胡益川^[13]研究了不同淬火温度下(900~1 000 °C)高碳中铬合金钢(0.75% C, 4% Cr)的组织及力学性能, 发现热处理后其组织主要由马氏体、碳化物颗粒及残余奥氏体组成, 淬火温度900 °C时合金钢耐磨性能最好。

为了进一步提高中铬合金钢的耐磨性, 本文通过提高中铬合金钢的碳及铬含量, 并对其他微量合金成分及热处理工艺进行重新设计, 研究了热处理工艺及碳含量对其组织、力学性能及耐磨性能的影响。

1 试验方法

1.1 合金钢成分

为了进一步提高中铬合金钢的耐磨性, 对于耐磨合金钢成分的设计, 首先需要较高的碳含量使其有足够的硬度, 且铬可以在钢中形成M₇C₃型或者M₂₃C₇型碳化物。钼可以使钢的晶粒细化, 提高淬透性; 镍可以提高钢的强度, 又保持良好的塑性和韧性。同时铬、钼、镍的三元合金化作用可以提高奥氏体的稳定性, 阻止其发生珠光体转变。被设计的耐磨合金钢成分如表1所示。

1.2 热处理工艺

结合JmatPro对耐磨合金钢不同温度的相组成计算以及Fe-C-Cr三元合金纵切面相图的分析, 设计五个淬火温度: 860 °C, 900 °C, 940 °C, 980 °C, 1 020 °C。

热处理工艺为: 1 000 °C高温退火+不同温度淬火(空冷)+220 °C低温回火。

1.3 磨料磨损

采用磨料磨损表征合金钢的磨损性能。图1a为试验机器运行示意图, 试验时

将两个试样分别安装在机械臂的夹具上, 试样规格如图1b所示, 磨损面朝下与轨道接触。通过外加砝码调控施加于试样上的载荷, 试样被紧压在与钢轨构成摩擦副的环形钢轨上做匀速圆周运动, 同时固定在转轴上的刮板会不断地将磨料刮到轨道上以便试样磨损。磨料通过试样梯形截面进入试样与钢轨之间, 随着试样与钢轨相对运动, 磨料在试样和钢轨之间发生转动和滑动, 呈现出三体磨料磨损现象。本文的磨料为石英砂, 每次试验磨料定量7 kg, 磨料在磨损过程中会被磨小, 为了保持各试样的试验条件一致, 更换试样的时候更换磨料, 试验载荷30 N, 主轴转速30 r/min, 预磨时间20 min。试样单次磨损1 h, 共磨损5次, 记录每次磨损的质量损失。

采用洛氏硬度计测试合金钢的硬度 (HRC); 摆锤冲击试验机测试冲击韧性; 采用Smartlab X 射线衍射仪 (XRD) 确定合金钢的相组成, XRD扫描范围为 $20^{\circ} \sim 100^{\circ}$; 采用金相显微镜 (OM) 和扫描电镜 (SEM) 观察分析合金钢热处理后的组织; 采用SEM观察试样的磨损表面形貌。

2 试验结果

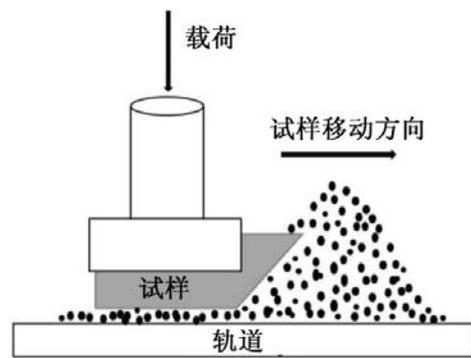
2.1 力学性能

中铬合金钢的铸态硬度为HRC32, 热处理后硬度显著提高, 见图2。图2a为1[#]合金钢经退火、不同温度淬火以及低温回火后的力学性能数据。由图可知, 淬火温度为 $860 \sim 980^{\circ}\text{C}$ 时硬度在HRC58左右; 当淬火温度达到 1020°C , 硬度大幅降低至HRC54.5。合金钢在 900°C 与 940°C 淬火的冲击韧性相对较差; 860°C 、 980°C 与 1020°C 淬火的冲击韧性相对较好, 且以 980°C 最佳为4.4 J。综合其硬度及冲击韧性, 对后续不同C含量的中铬合金钢热处理工艺均采用 1000°C 退火+ 980°C 淬火

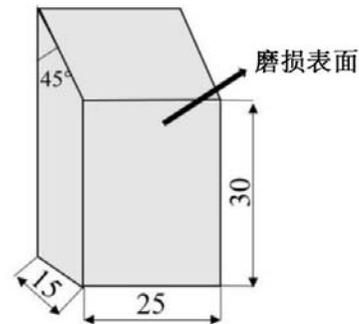
表1 耐磨合金钢化学成分

Table 1 Chemical composition of wear-resistant alloy steel in the present study

试样编号	C	Cr	Mo	Ni	P, S	Fe
1 [#]	1.1	5~7	0.7~1.5	0.5~1.0	≤ 0.04	余量
2 [#]	1.0	5~7	0.7~1.5	0.5~1.0	≤ 0.04	余量
3 [#]	0.9	5~7	0.7~1.5	0.5~1.0	≤ 0.04	余量



(a) 磨损工况



(b) 磨损试样

图1 磨料磨损示意图

Fig. 1 Schematic diagram of abrasive wear test

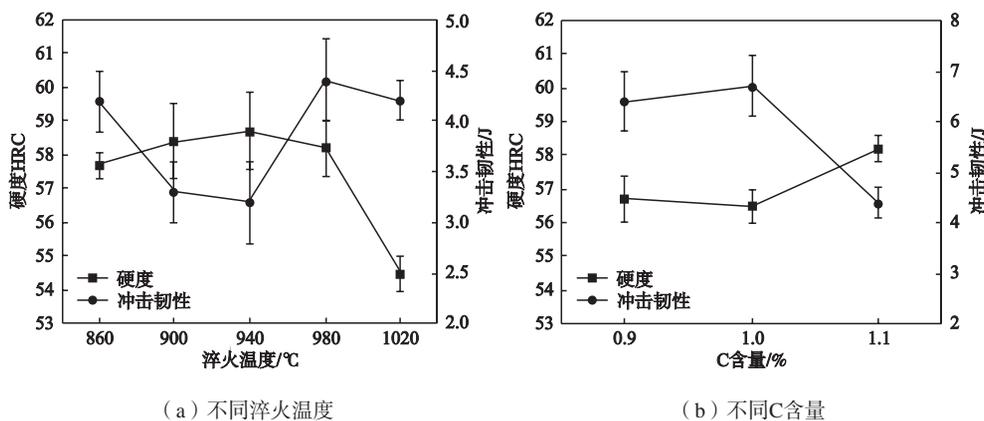


图2 合金钢的力学性能

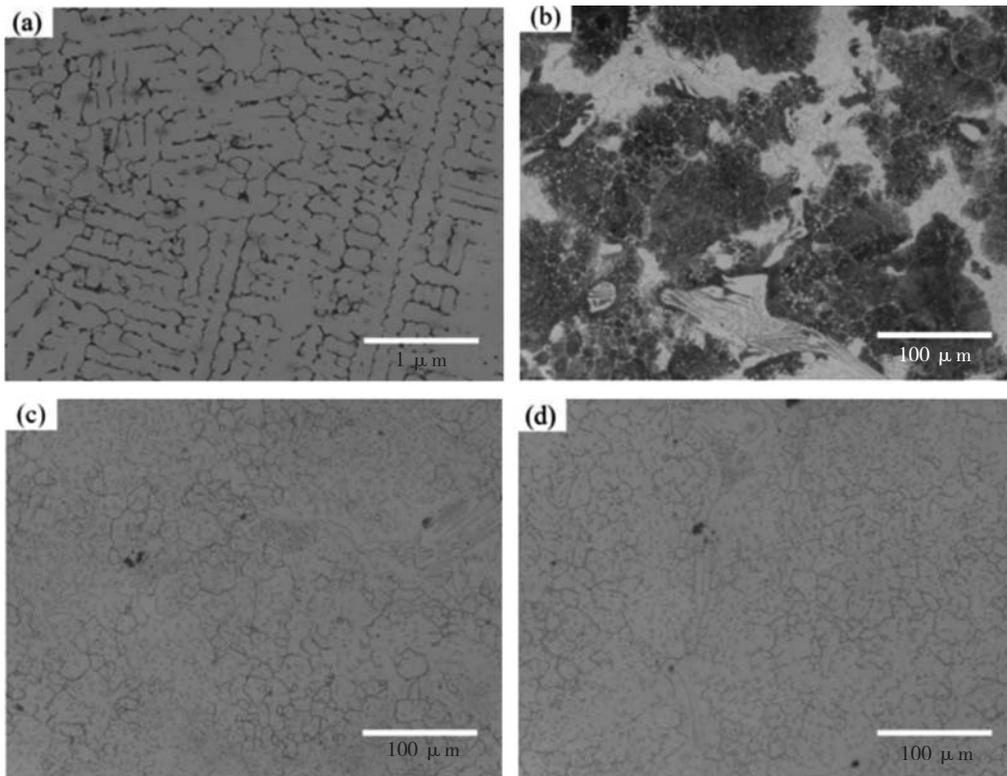
Fig. 2 Mechanical properties of alloy steels

+220 ℃回火。如图2b所示, C含量降低后, 2[#] (1.0% C) 中铬合金钢冲击韧性相对1[#] (1.1% C) 显著提高, 硬度亦下降较明显。但是3[#] (0.9% C) 中铬合金钢相对2[#] (1.0% C) 的冲击韧性与硬度变化较小。

2.2 热处理态组织

图3为1[#]中铬合金钢 (1.1% C) 铸态及经1 000 ℃退火、980 ℃淬火、220 ℃回火后用4%硝酸酒精腐蚀

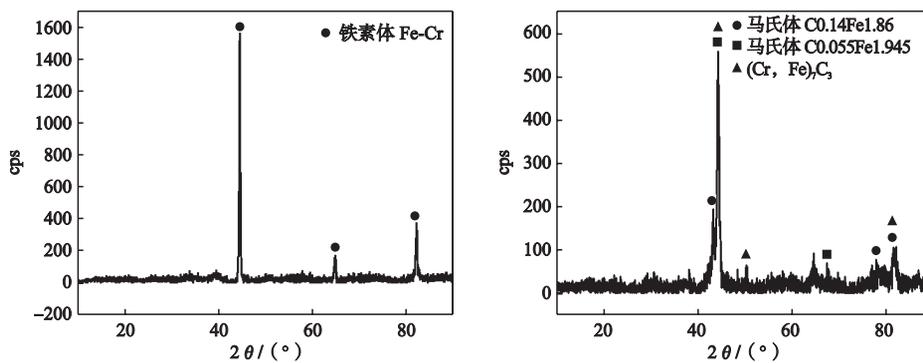
的金相组织照片。铸态时为粗大的枝晶+大量碳化物。经XRD衍射分析 (图4) 可知, 退火态组织以铁素体为主, 且存在较大的M₇C₃碳化物+其他碳化物。淬火态与回火态组织在金相显微镜下可以观察到较小的晶粒, 且存在明显区别于退火态的均匀分布的小颗粒碳化物, 结合其微观形貌及XRD衍射分析可知, 其主要由马氏体及M₇C₃碳化物组成, 马氏体细小。



(a) 铸态; (b) 退火态; (c) 淬火态; (d) 回火态

图3 不同热处理态的1[#]合金钢金相组织

Fig. 3 Metallographic structure of alloy steel containing 1.1% C in different heat treatment states



(a) 退火态

(b) 回火态

图4 1[#]合金钢退火态及回火态XRD图谱

Fig. 4 XRD patterns of annealed and tempered alloy steels containing 1.1% C

图5为不同温度淬火+回火的合金钢经4%硝酸酒精腐蚀后的金相组织(1#, 1.1% C, 1 000 °C退火, 220 °C回火)。由图可知, 随着淬火温度提高, 合金钢的晶粒逐渐粗大, 且部分碳化物溶解, 弥散分布的小颗粒 M_7C_3 碳化物变的更为细小。860 °C淬火的中铬合金钢其晶粒十分细小, 晶粒尺寸小于 $5 \mu\text{m}$; 随着淬火温度升高, 合金钢的晶粒逐渐增大; 1 020 °C淬火合金钢的晶粒较大, 已达 $50 \mu\text{m}$ 左右。860 °C淬火和940 °C淬火对小颗粒的 M_7C_3 碳化物尺寸影响不大, 但980 °C淬火的小颗粒 M_7C_3 碳化物尺寸缩小了一倍。当淬火温度达到1 020 °C时, 小颗粒 M_7C_3 碳化物大部分溶解。

图6是不同热处理态的1#中铬合金钢经4%硝酸酒精腐蚀后的SEM照片。1#中铬合金钢铸态组织中碳化物很大, 根据扫描能谱得知, 组织有硫化物夹杂。980 °C淬火态组织由残余奥氏体, 弥散分布的小颗粒 M_7C_3 碳化物及马氏体组成, 马氏体呈竹叶状, 相互不平行分布, 是典型的片状马氏体, 经220 °C回火后其组织中马氏体明显增加。

2.3 磨料磨损性能

图7是不同C含量的中铬合金钢经1 000 °C退火+

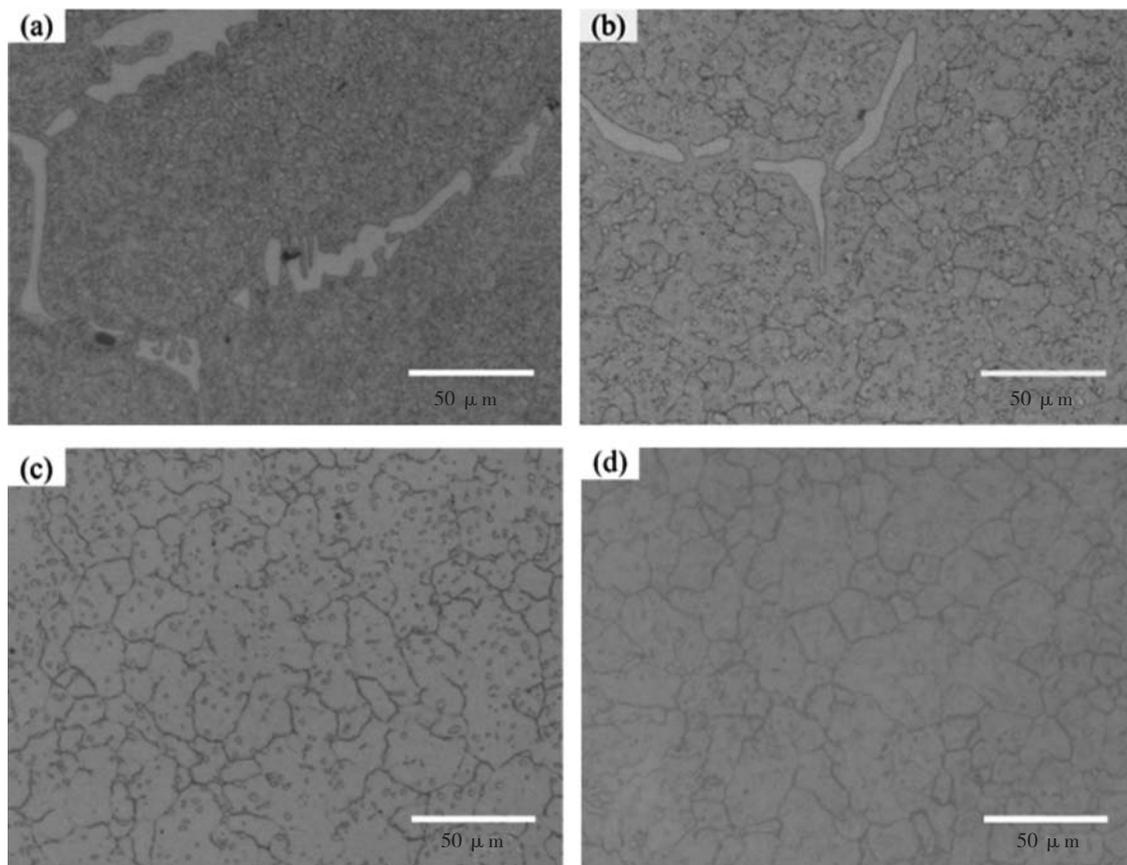
980 °C淬火+220 °C回火热处理后的磨料磨损测试结果。可以看到, 随着C含量降低, 质量损失有所增加, 但是增加程度不大, 而且铸态合金钢的磨料磨损质量损失明显大于热处理后的合金钢。由图8不同C含量合金钢的磨料磨损形貌可以看到, 铸态试样砂子划过的犁沟痕迹比回火态要深, 且不同碳含量合金钢热处理后的磨损形貌区别不大。铸态及不同碳含量热处理态合金钢的磨损表面都有部分砂子嵌入合金钢表面。

3 分析与讨论

3.1 淬火温度对合金钢组织和性能的影响

在中铬合金钢成分、退火温度、回火温度一定的情况下, 淬火温度升高, 晶粒增大, 碳化物逐渐溶解, 在860~940 °C淬火时钢中大块碳化物溶解, 但硬度变化不大; 当淬火温度达980 °C时, 小颗粒碳化物也开始溶解缩小; 淬火温度升高至1 020 °C时, 小颗粒碳化物已全部溶解, 这也是1 020 °C淬火合金钢硬度显著降低的主要原因^[14-15]。

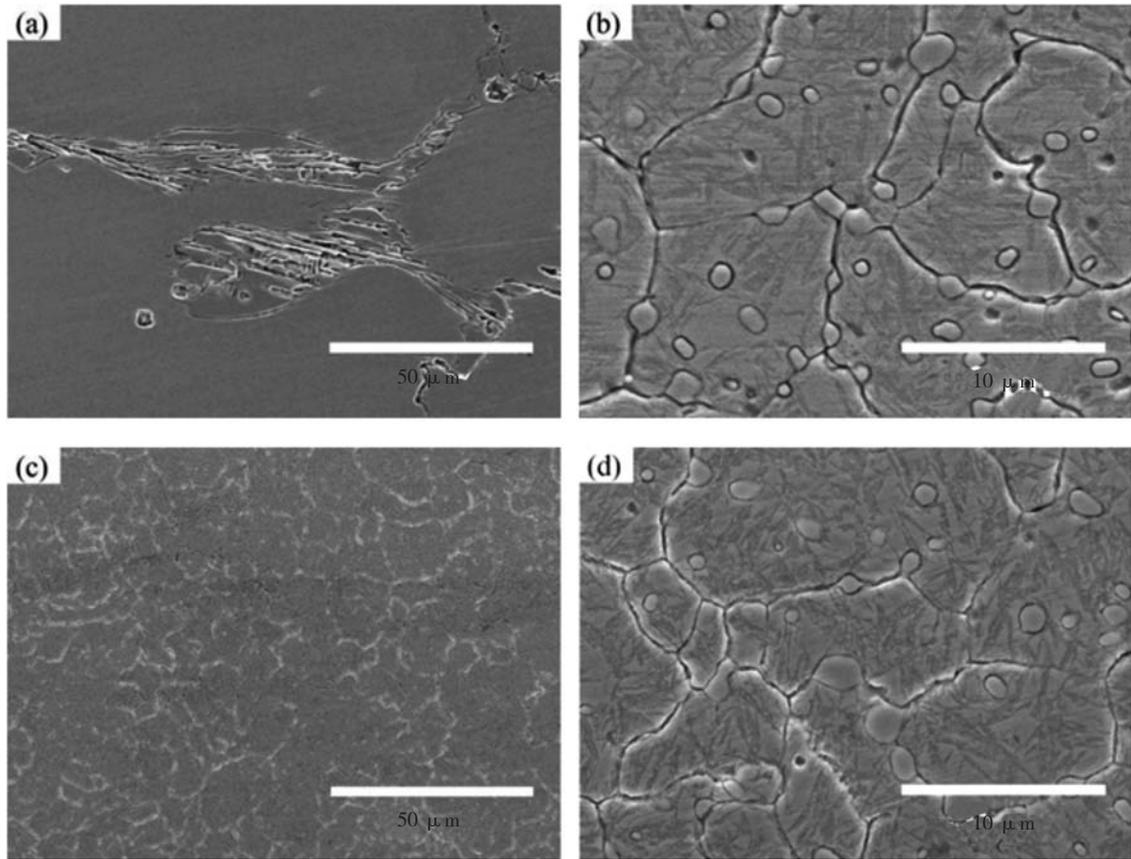
对于不同淬火温度合金钢的冲击韧性, 淬火温度的升高一方面使晶粒长大, 一方面又使碳化物溶解,



(a) 860 °C; (b) 940 °C; (c) 980 °C; (d) 1 020 °C

图5 不同淬火温度的1#合金钢金相组织

Fig. 5 Metallographic structure of alloy steel containing 1.1% C at different quenching temperatures + 220 °C tempering



(a) 铸态; (b) 淬火态; (c) (d) 回火态

图6 不同热处理态的1[#]合金钢微观形貌

Fig. 6 SEM microstructure of alloy steels containing 1.1% C under different heat treatment conditions

而晶粒长大降低冲击韧性，碳化物溶解会提高冲击韧性，两者综合影响合金钢的冲击韧性，于是出现冲击韧性先降后增的情况。

综合考虑淬火温度对中铬合金钢力学性能的影响，淬火温度确定为980 °C。因为980 °C淬火的中铬耐磨合金钢晶粒适中，小颗粒碳化物弥散分布，具有较高的硬度和冲击韧性，且经过此热处理工艺后的合金钢其耐磨性能相对于铸态有显著提高。因此，该耐磨合金钢的热处理工艺采用1 000 °C退火+980 °C淬火+220 °C回火。

3.2 碳含量对合金钢性能的影响

中铬合金钢的碳含量改变会影响碳化物及马氏体，从而显著影响合金钢的硬度及冲击韧性^[16]。足够的碳含量可以让 M_7C_3 碳化物充分生成，提高硬度。随着碳含量增加，固溶在马氏体中的碳增多，且晶格畸变程度增大，使硬度升高。但是中铬合金钢内的碳化物会使材料脆性提高降低冲击韧性，而且片状马氏体以非平行方式成长而相互冲突时，往往会造成显微裂纹，降低韧性。耐磨性能主要受材料硬度影响，高硬度的 M_7C_3 碳化物和马氏体在磨损过程中能够有效抵

抗磨损，提高耐磨性能，所以碳含量提高使硬度升高后，耐磨性能也会升高，于是1[#]（1.1% C）合金钢表现出较好的耐磨性能，但是其冲击韧性太低，且磨损工况难免存在冲击，难以应对复杂的磨损工况。而2[#]（1.0% C）合金钢相对而言，冲击韧性较高，耐磨性能较好，是耐磨合金钢较为合适的选择。

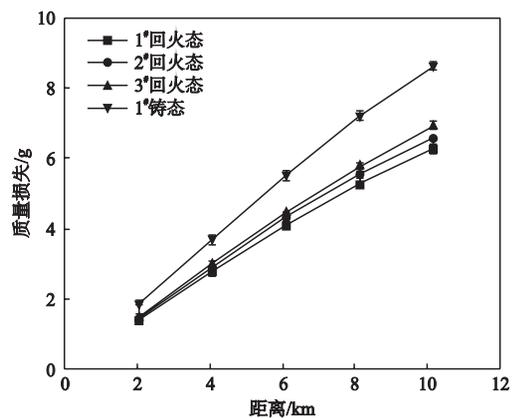
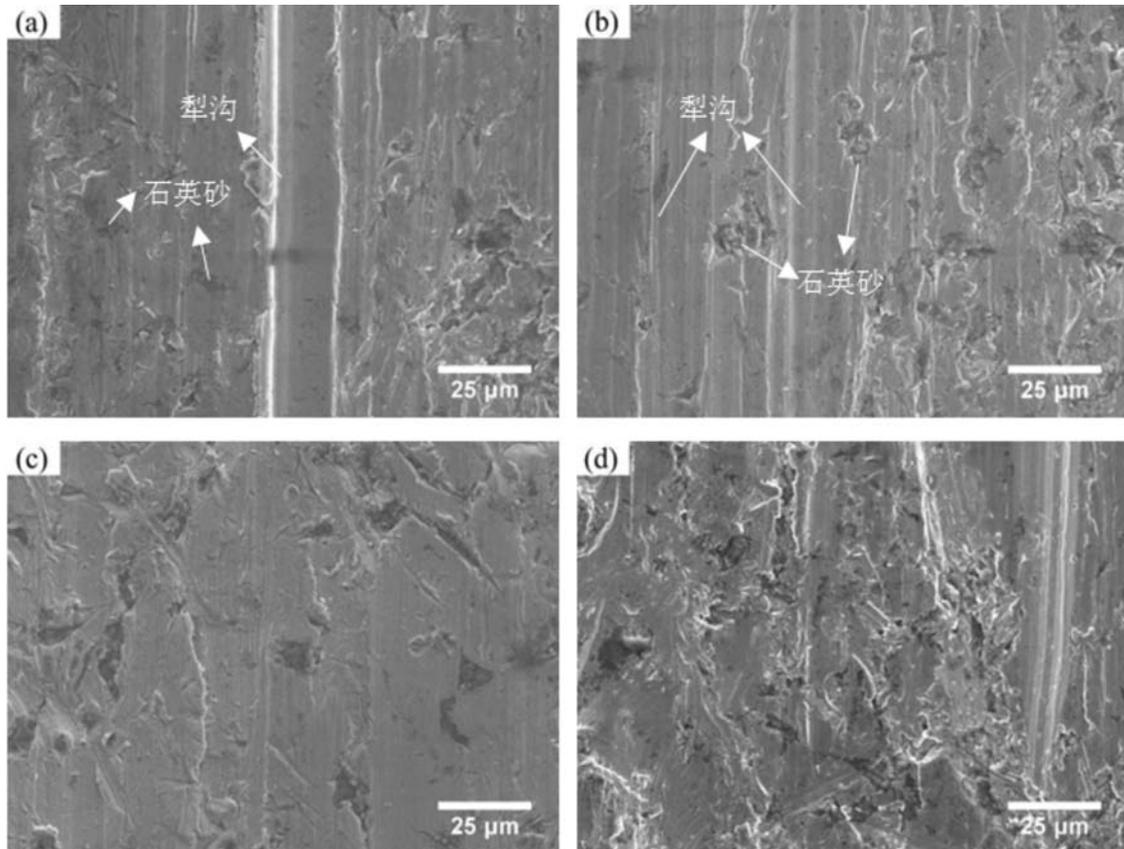


图7 合金钢磨料磨损质量损失

Fig. 7 Weight loss of as cast and heat treated alloy steels



(a) 1[#]铸态; (b) 1[#]回火态; (c) 2[#]回火态; (d) 3[#]回火态

图8 合金钢磨料磨损表面形貌

Fig. 8 Worn surface morphologies of as cast and heat treated alloy steels (+980 °C quenching + 220 °C tempering)

3.3 合金钢的磨料磨损性能

磨料磨损有切削, 破碎, 疲劳, 拔出等磨损机理^[17]。其中, 切削是磨料擦过金属的表面而产生犁沟; 破碎一般是材料较脆时, 磨料在应力作用下压入造成材料破碎产生裂纹; 疲劳是较大应力的重复作用下使材料反复变形, 使材料产生疲劳损伤, 从而出现剥落; 拔出是在晶粒间结合较弱且晶粒尺寸较大时发生。

本文的耐磨合金钢磨损机理主要以切削磨损为主, 在磨损形貌中皆可看到磨料切削产生的犁沟。由磨损形貌照片中可以看到较多的石英砂压入合金钢表面, 石英砂压入后, 合金钢并没有裂纹产生, 说明其没有发生破碎磨损, 而是石英砂压入后在切应力的作用下向前推进, 发生切削磨损, 产生犁沟。铸态合金钢硬度较低, 石英砂更易压入, 于是相对于热处理后的合金钢其犁沟痕迹明显更深, 磨损较为严重。而对

于不同碳含量的中铬合金钢, 由于其硬度改变不大, 且石英砂硬度较高, 所以其磨损形貌无明显区别。

4 结论

(1) 1 000 °C退火+980 °C淬火+220 °C回火热处理后的合金钢显微组织以片状马氏体为主, 且有密集的 M_7C_3 型碳化物小颗粒均匀分布。

(2) 随着淬火温度升高, 合金钢晶粒增大, 碳化物逐渐溶解, 两者综合影响合金钢力学性能。在1 000 °C退火+980 °C淬火+220 °C回火处理的合金钢拥有良好的力学性能, 且耐磨性能较铸态显著提高。

(3) 2[#]合金钢(1.0% C)经过1 000 °C退火+980 °C淬火+220 °C回火热处理后, 大量 M_7C_3 型碳化物小颗粒均匀分布在马氏体组织内, 具有较高的冲击韧性和优异的耐磨性能。

参考文献:

- [1] 董瀚. 合金钢的现状与发展趋势 [J]. 特殊钢, 2000 (5): 1-10.
- [2] JIE Z, KIEKENS C, HERTELÉ S, et al. Identification and prediction of mixed-mode fatigue crack path in high strength low alloy steel [J]. Proceedings (American Bar Association. Section of International and Comparative Law), 2018, 2 (8): 504.
- [3] FU Hanguang, CHENG Xiaole, DU Zhongze, et al. Effect of quenching temperature on structure and properties of centrifugal casting high speed steel roll [J]. China Foundry, 2009, 6 (1): 15-19.
- [4] 李卫, 邓世萍, 宋量, 等. 铸造耐磨材料 [J]. 铸造设备与工艺, 2019 (1): 61-68.
- [5] 边敦亭. 高锰钢耐磨性影响因素的研究 [J]. 安徽冶金, 2017 (2): 28-30.
- [6] DUONG N, THI Chieu L, KHANH P M. Studies on the mechanism of work hardening of austenitic high manganese steel alloyed with chromium and vanadium [J]. Key Engineering Materials, 2017, 737: 32-37.
- [7] SUN J J, WANG L, LIAN F L, et al. Microstructure and properties and fracture surface analysis of a medium carbon and medium Cr wear-resistant steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2011, S1: 428-430.
- [8] BALUC N, GELLES D S, JITSUKAWA S, et al. Status of reduced activation ferritic/martensitic steel development [J]. Journal of Nuclear Materials, 2007, 367-370: 33-41.
- [9] 张新恩, 姜利坤, 郭建斌, 等. 一种耐磨中铬合金钢热处理工艺研究 [J]. 铸造, 2017 (6): 632-635.
- [10] 李顺杰, 杨弋涛, 彭坤, 等. 奥氏体化温度对Cr5合金钢组织和性能的影响 [J]. 金属热处理, 2010, 35 (1): 110-113.
- [11] MOLINARI A, STRAFFELINI G, CAMPESTRINI P. Influence of microstructure on impact and wear behaviour of sintered Cr and Mo steel [J]. Powder Metallurgy, 1999, 42 (3): 235-241.
- [12] 郭继伟, 郭楠, 张成军, 等. 热处理工艺参数对高碳中铬合金钢衬板性能的影响 [J]. 铸造, 2009, 58 (6): 602-604.
- [13] 胡益川, 黄维刚. 淬火温度对高碳中铬钢组织及力学性能的影响 [J]. 铸造技术, 2016 (5): 904-907.
- [14] 赵辉, 王法云, 李红英. 淬火温度对3Cr2Mo钢组织性能的影响 [J]. 金属材料与冶金工程, 2015 (6): 8-14.
- [15] 吴伟, 李艳霞, 刘翊安, 等. 淬火温度对离心铸造碳钢-高铬铸铁复合管组织及硬度的影响 [J]. 铸造, 2015, 64 (9): 920-922.
- [16] POORGANJI B, MIYAMOTO G, MAKI T, et al. Formation of ultrafine grained ferrite by warm deformation of lath martensite in low-alloy steels with different carbon content [J]. Scripta Materialia, 2008, 59 (3): 279-281.
- [17] SIN H, SAKA N, SUH N P. Abrasive wear mechanisms and the grit size effect [J]. Wear, 1979, 55 (1): 163-190.

Microstructure and Abrasive Wear Resistance of High Carbon Medium Chromium Wear Resistant Alloy Steel After Heat Treatment

NING Jia-pei^{1,2}, ZHENG Kai-hong², ZHOU Hong-ming¹, WANG Hai-yan², LONG Jun²

(1. School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China; 2. Guangdong Institute of Materials and Processing, Guangdong 510651, Guangzhou, China)

Abstract:

An investigation was carried out to examine the effects of different quenching temperatures on the microstructure and mechanical properties of medium chromium wear-resistant alloy steel. The mechanical properties and wear resistance of the medium chromium alloy steels with varying carbon content after heat treatment were tested, and the wear mechanism was analyzed. The results show that, with increasing quenching temperature in the temperature range of 860-1 020 °C, the grains in the microstructure trend to grow up and the carbides gradually dissolve, which result in a significant decrease in hardness. Moreover, the impact toughness first decreases and then increases. After annealing at 1 000 °C, quenching at 980 °C and tempering at 220 °C, the microstructure of high carbon medium chromium wear-resistant alloy steel containing 1.0% C is dominated by lamellar martensite, with a large number of M_7C_3 type carbide particles evenly distributed throughout the matrix, which has ensured that the alloy steel has high impact toughness and excellent abrasive wear performance.

Key words:

wear resistant alloy steel; quenching temperature; abrasive wear; martensite; M_7C_3