

铸型对中碳低合金耐磨钢硬韧性和耐磨性的影响

王超众^{1, 2}, 平宪忠³, 李卫^{1, 2}

(1. 暨南大学先进耐蚀蚀及功能材料研究院, 广东广州 510632; 2. 暨南大学高性能金属耐磨材料技术国家地方联合工程研究中心, 广东广州 510632; 3. 临沂天阔铸造有限公司, 山东临沂 276000)

摘要: 采用SEM、XRD、冲击试验机和动载冲击磨料磨损试验机等, 研究了三种不同冷却速度铸型下铸造锤头用中碳低合金耐磨钢的显微组织、硬度、冲击韧性和耐磨性。结果表明, 三种试样显微组织均由回火马氏体、碳化物和残余奥氏体组成, 且使用金属激冷铸型制成的钢, 回火马氏体更加细小。对比石英砂铸型, 使用金属激冷铸型的钢试样洛氏硬度、冲击韧性和耐磨性提升2.7%、16.1%以及14.6%。冷却速度高的铸型, 有利于钢组织细化, 同时提高硬度和耐磨性。

关键词: 低合金耐磨钢; 铸型; 显微组织; 力学性能; 耐磨性

作者简介:

王超众(1997-), 男, 硕士, 主要研究方向为金属材料磨损与失效分析。E-mail: 869199391@qq.com

通讯作者:

李卫, 男, 教授, 博士。E-mail: Lwxasn@sohu.com

中图分类号: TG146.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)

03-0235-06

基金项目:

广东省自然科学基金项目 2022A1515010091; 广东省科技计划项目 2017B090903005。

收稿日期:

2022-06-28 收到初稿,

2022-09-22 收到修订稿。

磨损是金属材料在机械行业常见的失效形式之一, 在所有磨损形式中以磨料磨损最为严重^[1-2]。在冶金、建材、建筑、电力、机械、国防等行业, 我国每年在磨损维护方面花费大量资金, 金属耐磨材料在这些行业得到广泛应用^[3-4]。据公安部统计, 截至2022年3月底, 全国机动车保有量达4.02亿辆, 其中汽车3.07亿辆, 2021年报废汽车回收拆解量近250万辆, 相比2020年增长20%之多。在如此众多的汽车保有量和报废需求的情况下, 汽车的报废回收尤为重要, 研究拆解回收报废汽车的方法在环保与经济方面有着重要意义^[5-6]。

我国报废汽车的一般拆解流程为: 预处理、汽车拆解、车壳压缩破碎、破碎物分选以及登记入库。其中, 车壳压缩破碎的方式是运用破碎机对报废汽车进行破碎^[7]。在目前所使用的破碎机中, 锤式破碎机被认为较适合破碎汽车车壳这类轻薄型金属^[8-9]。锤式破碎机在转盘上安装的锤头经过高速旋转对物料进行撞击, 被破碎后的物料冲向反击板, 而后又被反弹继续被锤头破碎, 最后在锤头破碎和重力作用下排出出口^[10]。由此可见, 锤式破碎机的关键部件为锤头, 锤头在恶劣的工况下服役, 受到强烈的冲击磨损^[11-13], 提高锤头的硬韧性和耐磨性十分必要。

本文重点研究三种不同冷却速度铸型(石英砂、陶瓷砂、金属激冷铸型)对大型锤头用低合金耐磨铸钢显微组织、硬度、韧性和抗冲击磨料磨损性能的影响。

1 试验材料与方法

本研究大型锤头用中碳低合金耐磨铸钢主要化学成分如表1所示, 通过中频感应炉熔炼钢液后浇注的锤头如图1所示, 锤头厚度80 mm, 锤柄厚度60 mm。

在三种不同冷却速度的锤头铸型(石英砂、陶瓷砂、金属激冷铸型)内分别浇入同成分铸钢合金液, 因为铸型导热和散热以及表面激冷能力不同, 石英砂、陶瓷砂、金属激冷铸型促使铸钢件凝固冷却速度依次提高。结合碳当量计算法^[14], 不同冷却速度铸造的铸钢锤头采用的热处理工艺曲线如图2所示, 即: 铸钢锤头加热至1 000 °C保温6 h正火处理后, 再经900 °C保温6 h后在水溶性淬火液^[15-16]内淬火,

表1 锤头用中碳低合金钢主要化学成分
Table 1 Main chemical composition of medium carbon low alloy steel for hammer

| C | Si | Mn | Cr | Mo | Ni | $w_B/\%$ |
|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
| 0.50~0.55 | 1.0~1.4 | 0.6~1.0 | 0.6~1.0 | 0.3~0.6 | 1.5~1.8 | |

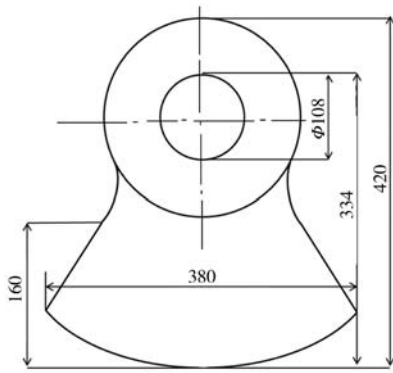


图1 中碳低合金钢锤头示意图

Fig. 1 Sketch of medium carbon low alloy steel hammer

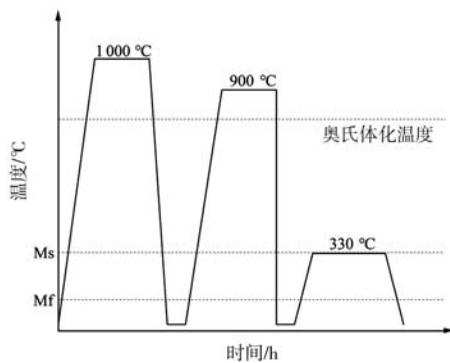


图2 锤头热处理工艺曲线

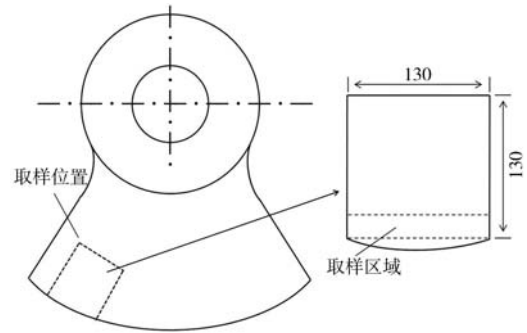
Fig. 2 Heat treatment process curve of hammer

之后330 °C保温回火处理。

为了控制单一变量，减小误差，选择在锤头（锤头厚度80 mm）同一位置取规格为130 mm × 130 mm × 80 mm的金属试块，如图3a所示。在金属试块的同一靠近锤头表面处线切割出10 mm × 10 mm × 55 mm的V形缺口冲击试样，以及10 mm × 10 mm × 30 mm，磨损面为直径50 mm圆弧的冲击磨料磨损上试样，取样区域如图3b所示。对石英砂、陶瓷砂、金属激冷铸型制成的样品，分别标记为A1、A2和A3。

洛氏硬度（HRC）测试在1 471 N的载荷下进行；冲击试验使用JBW-300HC摆锤冲击试验机；磨损试验使用的MLD-10型冲击磨料磨损试验机，磨损原理如图4所示。试样在预磨30 min后再进行150 min的磨损试验，配副摩擦副为淬火回火态45号钢，硬度HRC49。磨损试验参数如表2所示。

使用X射线衍射仪（XRD）对试验钢的物相进行



(a) 试块取样位置 (b) 测试试样取样区域

图3 试样取样位置

Fig. 3 Sampling position of sample

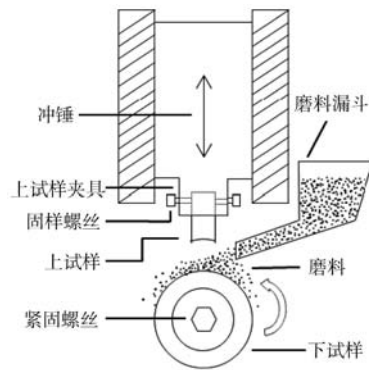


图4 冲击磨料磨损试验机原理示意图

Fig. 4 Schematic diagram of impact abrasive wear testing machine

表2 冲击磨料磨损试验机参数
Table 2 Parameters of impact abrasive wear testing machine

| 项目 | 参数值 |
|------------------------------|-------------|
| 磨损冲击功/J | 4.5 |
| 冲锤重量/kg | 10 |
| 冲击次数/(次·min ⁻¹) | 100 |
| 下试样转速/(r·min ⁻¹) | 200 |
| 冲锤自由落体高度/mm | 45 |
| 磨料粒度/目 | 60~80 (石英砂) |
| 磨料流速/(kg·h ⁻¹) | 50 |

分析，采用扫描电子显微镜（SEM）分析研究钢显微组织、冲击断口形貌、磨损面形貌和亚表层组织变化。

2 试验结果与讨论

2.1 显微组织

对三种试样分别进行XRD物相分析，分析结果如图5所示。从图中可以看出，三种试样的物相均由 α -Fe、 γ -Fe和Fe₃C碳化物组成（图6）。结合钢热处理工艺，判断三种试样显微组织都是由回火马氏

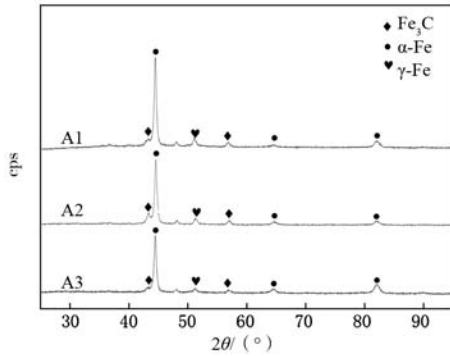
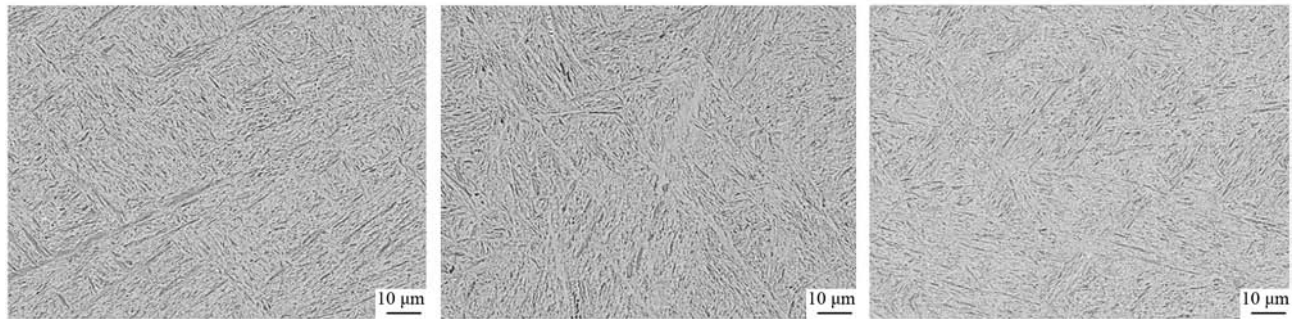


图5 三种试样的XRD物相分析图
Fig. 5 XRD phase analysis of the three samples



(a) A1-石英砂铸型

(b) A2-陶瓷砂铸型

(c) A3-金属激冷铸型

图6 三种试样的显微组织

Fig. 6 Microstructure of the three samples

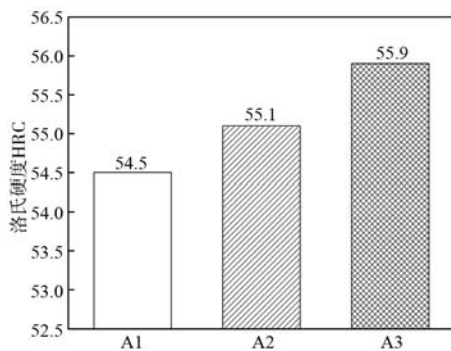


图7 三种试样的硬度

Fig. 7 Hardness values of the three samples

的试样A1的洛氏硬度为HRC54.5, 使用陶瓷砂铸型制成的试样A2测得的洛氏硬度为HRC55.1, 使用金属激冷铸型制成的试样A3测得的洛氏硬度为HRC55.9。石英砂、陶瓷砂、金属激冷铸型, 随着铸型激冷钢液的凝固冷却速度提高, 铸钢的硬度提高。这是因为A1、A2、A3试样的回火马氏体逐渐细小。根据Hall-Patch公式, 材料的强度与晶粒尺寸成反比, 由此可知此试样的强度和硬度随之提高。

对三种试样进行冲击试验, 并使用冲击试验机自带的“仪器化冲击试验机”软件, 采用“力-位移”曲线模型模拟, 经过自动计算起始点、重构分析曲线、

体、 Fe_3C 碳化物和残余奥氏体组成, 采用Image J软件对回火马氏体宽度进行测量, 测量结果为: A1为 $(0.711 \pm 0.156) \mu\text{m}$, A2为 $(0.565 \pm 0.084) \mu\text{m}$, A3为 $(0.389 \pm 0.068) \mu\text{m}$ 。可见, 回火马氏体组织逐渐细小。显然石英砂、陶瓷砂、金属激冷三种铸型下钢的凝固冷却速度渐高, 凝固结晶过冷度渐大, 因而显微组织逐渐细小。

2.2 硬度与冲击韧性

试验对三种试样分别进行宏观洛氏硬度测试, 测试结果如图7所示。从图中可知, 使用石英砂铸型制成

自动查找特征值和拟合计算四个步骤, 拟合后误差均小于0.5 J, 数据结果如表3所示。从表中可以得知, 使用石英砂铸型制成的试样A1冲击吸收能量 (W) 读数为5.179 J, 软件拟合后总冲击吸收能量 (W_i) 为4.699 J, 拟合裂纹萌生能量 (W_f) 为4.102 J, 拟合裂纹扩展能量 (W_p) 为0.597 J, W_p 与 W_i 的比值为0.146; 使用陶瓷砂铸型制成的A2试样 W 为5.317 J, W_i 为4.840 J, W_f 为4.205 J, W_p 为0.635 J, W_p 与 W_i 的比值为0.151; 使用金属激冷铸型制成的A3试样 W 为6.011 J, W_i 为5.680 J, W_f 为4.867 J, W_p 为0.813 J, W_p 与 W_i 的比值为0.167。

W_p 与 W_i 的比值反应了材料的韧脆程度, 当比值大于1时, 为韧性断裂; 当比值小于1时, 为脆性断裂, 且比值越小脆性越大^[17-19]。由此可见, 三种试样的断裂方式均为脆性断裂, 且A1试样脆性在三者之中是最大的, A3试样脆性为最小。

表3 三种试样的冲击吸收能量

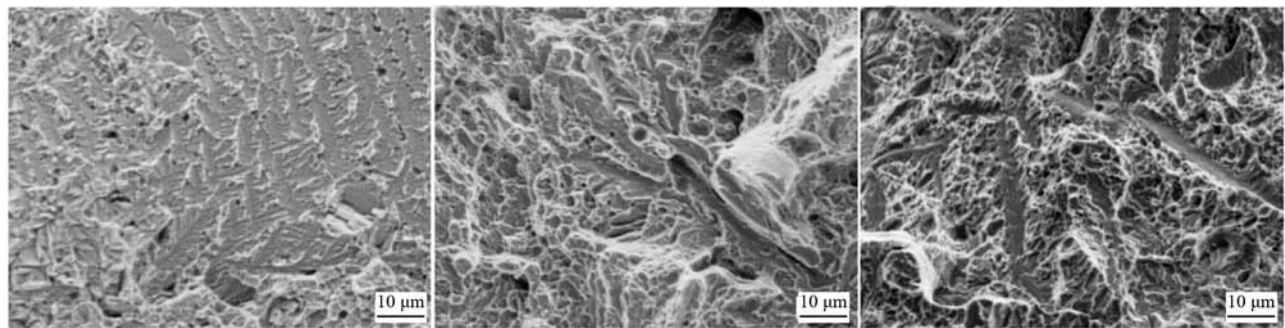
Table 3 Impact absorption energy of the three samples

| 试样 | 读数 W/J | 拟合总冲击吸 收能量 W_i/J | 拟合裂纹萌 生能量 W_f/J | 拟合裂纹扩 展能量 W_p/J | W_p/W_i |
|----|--------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------|
| A1 | 5.179 | 4.699 | 4.102 | 0.597 | 0.146 |
| A2 | 5.317 | 4.840 | 4.205 | 0.635 | 0.151 |
| A3 | 6.011 | 5.680 | 4.867 | 0.813 | 0.167 |

上述结果表明,石英砂、陶瓷砂、金属铸型,随着铸型激冷钢的凝固冷却速度提高,铸钢的冲击韧性有所提高。

为了进一步判断三种试样具体的断裂方式,试验分别对冲击后的试样断面进行扫描电镜(SEM)分析,断口形貌如图8所示。从三种试样断口的辐射状河流花样以及撕裂棱可以得知,这三种试样的断裂为准解理断裂^[20]。从图8a中可以看到,A1试样的断口有

着大量的解理台阶以及河流花样;图8b中反映出A2试样的断口不仅有着解理台阶和河流花样,还存在着撕裂棱;从图8c中可以看出A3试样断口形貌存在着解理台阶、河流花样,以及由小裂纹相遇发生塑性撕裂而形成的撕裂棱,因此韧性在三者中较好。相比A1试样而言,使用金属激冷铸型制成的A3试样,有着更加细小的回火马氏体,一定程度地阻碍了裂纹的萌生与扩展,因此韧性较好。



(a) A1-石英砂铸型

(b) A2-陶瓷砂铸型

(c) A3-金属激冷铸型

图8 三种试样的冲击断口形貌

Fig. 8 Impact fracture morphology of the three samples

2.3 抗冲击磨料磨损性能

使用MLD-10型冲击磨料磨损试验机对三种试样进行磨损测试,分别在预磨30 min后正式在4.5 J冲击功下磨损试验150 min,使用天平称量磨损试验前后试样的重量,并计算失重量,数据如图9所示。由图得知A1的磨损量为0.183 4 g,A2的磨损量为0.163 4 g,A3的磨损量为0.156 6 g。相比于A1而言,A2的耐磨性提高了10.9%,而A3的耐磨性提升了14.6%。石英砂、陶瓷砂、金属激冷铸型,随着铸型激冷能力增强,钢的凝固冷却速度提高,铸钢的抗冲击磨料磨损性能提高。

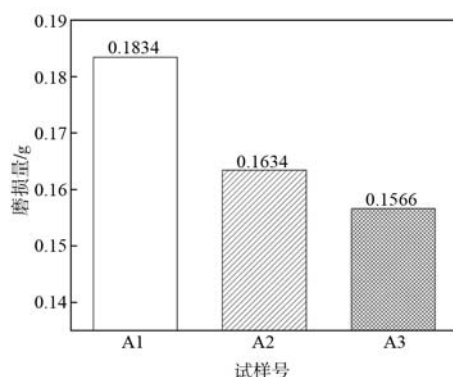


图9 三种试样的磨损量

Fig. 9 Wear loss of the three samples

为了进一步探究三种试样的磨损形貌及机制,对三种磨损后的试样的磨损面以及其亚表层进行SEM分

析,如图10所示。从图10(a1)可以看出,A1试样的磨损面在正应力与切应力共同作用下,形成了大量的较大较深的剥落坑以及长而宽的切削犁沟;通过对磨损面亚表层观察发现,在动载冲击磨料磨损的作用下,A1试样形成了较深的形变层,产生了较长裂纹,在裂纹萌生和扩展作用下形成较大的剥落坑,见图10(a2)。通过图10(b1)可以看出,A2试样的磨损面有着少量的短切削犁沟以及较小、较浅的剥落坑;且A2试样的截面亚表层有着短小而浅的裂纹,以及少量小而浅的剥落坑,见图10(b2)。图10(c1)为A3试样磨损面的形貌图,可以发现A3试样的磨损面只存在少量的短而窄的显微切削犁沟,以及少量小而浅的剥落坑;磨损截面亚表层由于有着细小的较高硬度回火马氏体,使其形变层较浅,只有极少量微小的裂纹和小而浅的剥落坑存在,见图10(c2)。

从上述三种试样的磨损面和截面亚表层形貌图来看,三者的耐磨性主要体现在抑制裂纹萌生与扩展的能力,以及减少犁沟数量上。三者相比而言,A3试样有着最少的显微切削犁沟以及微裂纹和小而浅的剥落坑,这是由于石英砂、陶瓷砂、金属激冷三种铸型下钢的凝固冷却速度渐高,A3试样的回火马氏体更加细小,使得其硬度、韧性及其匹配硬韧性提高,进而使耐磨性能提高。

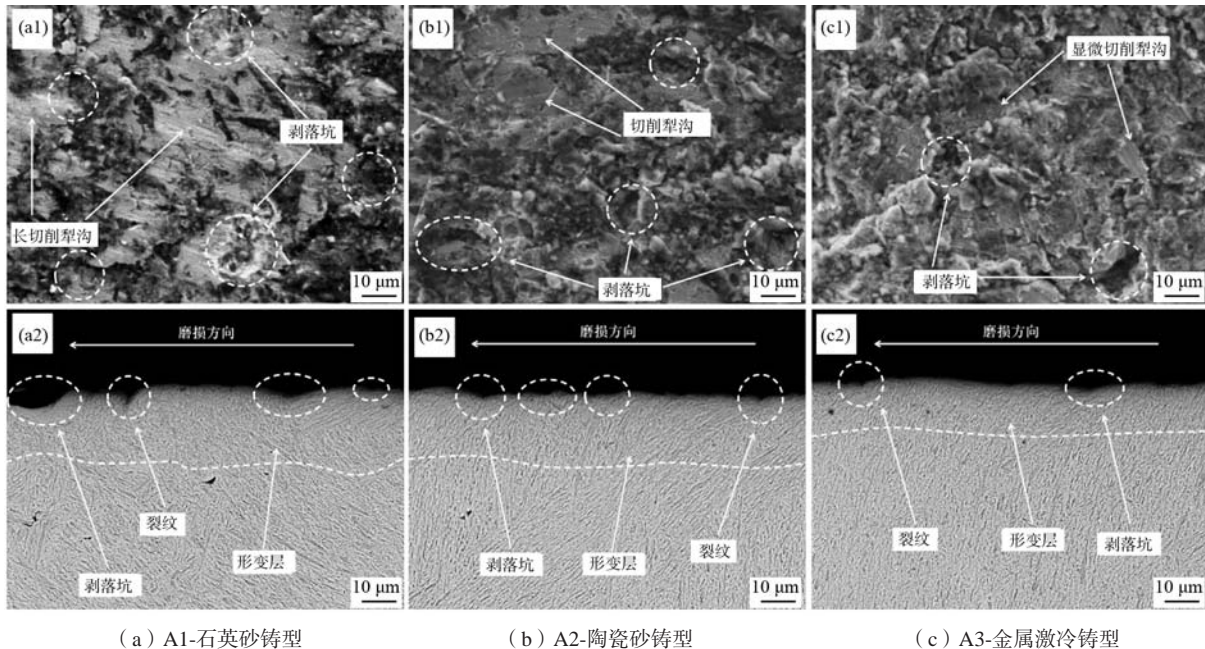


图10 三种试样的磨损面 (a1-c1) 和截面亚表层 (a2-c2) 形貌

Fig. 10 Morphologies of wear surface (a1-c1) and subsurface (a2-c2) of the three samples

3 结论

(1) 三种试样的显微组织均由回火马氏体、碳化物和残余奥氏体组成, 石英砂、陶瓷砂、金属激冷三种铸型下钢的凝固冷却速度渐高, 回火马氏体组织逐渐细小。

(2) 使用石英砂铸型制成的A1试样, 洛氏硬度为HRC 54.5, 冲击吸收能量为5.179 J; 使用陶瓷砂铸型制成的A2试样, 洛氏硬度为HRC 55.1, 冲击吸收能

量为5.317 J, 硬度、冲击韧性相对A1分别提升1.2%、2.7%; 使用金属激冷铸型制成的A3试样, 洛氏硬度为HRC 55.9, 冲击吸收能量为6.011 J, 硬度、冲击韧性相对A1提升2.7%、16.1%。

(3) 石英砂、陶瓷砂、金属激冷三种铸型下钢的凝固冷却速度渐高, 相对试样A1而言, 试样A2耐磨性能提高10.9%, 试样A3耐磨性能提高14.6%。

参考文献:

- [1] 陈华辉, 邢建东, 李卫. 耐磨材料应用手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012: 10.
- [2] 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.
- [3] 李卫. 中国铸造耐磨材料的发展——兼介中国铸造耐磨材料产业技术路线图 [J]. 铸造, 2012, 61 (9): 967-984.
- [4] 魏世忠, 徐流杰. 钢铁耐磨材料研究进展 [J]. 金属学报, 2020, 56 (4): 523-538.
- [5] 周育红, 姜朝阳. 我国汽车报废回收利用体系框架初探 [J]. 环境科学与技术, 2006 (3): 94-96, 120-121.
- [6] 陈元华, 杨沿平, 胡纾寒, 等. 我国报废汽车回收利用现状分析与对策建议 [J]. 中国工程科学, 2018, 20 (1): 113-119.
- [7] ZHANG Chunliang, CHEN Ming. Designing and verifying a disassembly line approach to cope with the upsurge of end-of-life vehicles in China [J]. Waste Management, 2018, 76: 697-707.
- [8] SANDER, SCHUBERT G. Size reduction of metals by means of swing-hammer shredders [J]. Chemical Engineering and Technology, 2003, 26 (4): 409-415.
- [9] 李茂林, 毛静波. 锤式破碎机锤头用新型耐磨材料的研制与选择 [J]. 铸造, 1998 (12): 26-29.
- [10] 刘岩, 柏福, 段国林. 基于ADAMS的锤式破碎机参数化建模及应用 [J]. 机械工程师, 2011 (11): 44-45.
- [11] 李卫. 中国铸造耐磨材料产业技术路线图 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [12] 李继林, 郑开宏, 高萌. 钢铁耐磨材料专利技术分析 [J]. 铸造技术, 2013, 34 (8): 941-948.
- [13] 张福全, 李娄明, 陈玉祥, 等. 大型多元低合金铸钢耐磨锤头的研制及应用 [J]. 铸造, 2011, 60 (2): 195-198.
- [14] 李智超, 刘鹏砚, 王明昱. Ms点的碳当量计算法 [J]. 辽宁工程技术大学学报 (自然科学版), 1998 (3): 293-295.
- [15] 高炳臣, 冯海滨, 赵越林, 等. 水溶性淬火介质对半自磨机用耐磨钢球的影响 [J]. 有色金属设计, 2016, 43 (2): 64-66.

- [16] 武兆洋, 平宪忠, 郑宝超, 等. 不同水基淬火介质对ZG30CrMnSiMo低合金钢组织和耐磨性的影响 [J]. 金属热处理, 2021, 46(5): 60-65.
- [17] FANG J. Study on the mechanism of strengthening and toughening effect of titanium addition on HSLA steel[C]//International Conference on Advanced Structural Steels, 2004: 354-358.
- [18] 方健. 单试样动态断裂性能评价方法与力值分析技术 [J]. 理化检验 (物理分册), 2005(8): 397-401, 404.
- [19] 普晓明, 敬仕煜, 刘学政, 等. 两种钢夏比V型冲击试验裂纹形成能量与扩展能量之间的关系 [J]. 理化检验 (物理分册), 2020, 56(4): 1-5, 13.
- [20] 蔡泽高, 刘以宽, 王承忠, 等. 金属磨损与断裂 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1985: 214.

Effect of Casting Mold on Hardness, Toughness and Wear Resistance of Medium-Carbon Low Alloy Wear-Resisting Steel

WANG Chao-zhong^{1,2}, PING Xian-zhong³, LI Wei^{1,2}

(1. Institute of Advanced Wear and Corrosion Resistant and Functional Materials, Jinan University, Guangzhou 510632, Guangdong, China; 2. National Joint Engineering Research Center of High Performance Metal Wear Resistant Materials Technology, Jinan University, Guangzhou 510632, Guangdong, China; 3. Linyi Tiankuo Casting Co., Ltd., Linyi 276000, Shandong, China)

Abstract:

The microstructure, hardness, impact toughness and wear resistance of medium carbon low alloy wear-resistant steel for hammer casting at three different cooling rates were studied by means of SEM, XRD, impact testing machine and dynamic load impact abrasive wear testing machine. The results show that the microstructures of the three samples are all composed of tempered martensite, carbide and retained austenite, and the tempered martensite of the alloy made by chilled metal mold is finer. Compared with the quartz sand casting, the rockwell hardness, impact toughness and wear resistance of the specimens with chilled metal mold increased by 2.7%, 16.1% and 14.6%. The casting with high cooling speed is beneficial to refine steel structure, improve hardness, toughness and hard toughness, and improve wear resistance.

Key words:

low alloy wear-resisting steel; casting mold; microstructure; mechanical properties; wear resistance
