DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.07.009

钢/铁双金属复合锤头的界面组织及性能研究

冯　波,龙　骏,郑志斌,郑开宏,王　娟,王海艳,冯晓伟
(广东省材料与加工研究所,广东 广州 510650)

摘　要:利用液-液复合铸造技术制备低合金钢/高铬铸铁双金属复合锤头。采用金相显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)、能谱分析仪(EDS)、背散射衍射系统(EBSD)和显微硬度分析仪研究钢/铁双金属复合锤头的界面组织与性能。结果表明,液-液复合铸造实现合金钢与高铬铸铁良好的冶金结合,界面处存在厚度约为30 μm的过渡层,界面处的显微硬度约为333 HV。

关键词:双液铸造;双金属;界面;微观组织;显微硬度

中图分类号:TG244+2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)07-0667-04

Study on the Microstructure and Properties of Steel/Iron Bimetal Hammer Interface

FENG Bo, LONG Jun, ZHENG Zhibin, ZHENG Kaihong, WANG Juan, WANG Haiyan, FENG Xiaowei
(Guangdong Institute of Materials and Processing, Guangzhou 510650, China)

Abstract: In this study, low carbon steel/high chromium cast iron bimetal hammer was successfully fabricated by liquid-liquid compound casting. The microstructure and properties of steel/iron bimetal hammer interface were analyzed by optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive spectrometer (EDS), electron back-scattered diffraction (EBSD) and microhardness tester. The results reveal that there is a good metallurgical bonding between low carbon steel and high chromium cast iron by liquid-liquid compound casting, the thickness and microhardness of diffusion layer are about 30 μ m and 333 HV, respectively.

Key words: liquid-liquid casting; bimetal; interface; microstructure; microhardness

高端破碎、粉碎设备是矿山、冶金、水泥、石化、电力等重要基础工业中的工程机械关键装备,其中锤头是破碎机上的关键易损件,其服役寿命直接影响到破碎效率和生产成本[1-6]。目前,国内外用于制备锤头的耐磨材料主要有高锰钢和高铬铸铁。高锰钢具有高韧性、易加工硬化的特点,在高应力和强冲击磨损条件下具有良好的耐磨性,但在中、低冲击力条件下,其工作表面难以实现加工硬化导致耐磨性较差。高铬铸铁具有优异的耐磨性能,一直被认为是破碎机锤头比较理想的耐磨材料,然而其冲击韧度较差导致锤头经常发生断裂,不适于高效低耗的现代化生产需要。因此,有必要开发新材料和新工艺,以期提高锤头的性能和使用寿命。

双金属复合材料是利用复合技术实现两种不同性能的金属材料在界面处实现良好的冶金结合的一种新材料[7-10],可发挥两种金属自身的优势,使其获得更优异的综合性能,节约资源,降低成本。利用复合技术制备的钢/铁双金属复合锤头兼具低碳合金钢的高韧性和高铬铸铁的高耐磨性,显著提高锤头的性能和使用寿命[11-18]。然而,如何制备高品质、界面结合良好的双金属复合锤头始终是耐磨行业的共性技术难点。本课题采用液-液复合铸造技术制备低碳合金钢/高铬铸铁双金属复合锤头,系统分析了钢/铁双金属复合锤头的界面组织及性能,将为液-液双金属复合铸造技术的推广与应用提供理论指导和技术支持。

1　试验材料与方法

1.1　试验材料

针对锤头的实际服役工况,锤柄选用韧性较好的低碳合金钢,锤头头部采用高耐磨性的高铬铸铁,试验材料的化学成分如表1。

1.2　试验方法

采用液-液复合铸造技术制备钢/铁双金属复

收稿日期:2019-05-07
基金项目:广东省科学院发展专项资金项目(2018GDASCX-0967,2019GDASYL-0302017);广州市对外合作项目(201807010085);广东省科技计划项目(2017A070701029,2017A050503004);清远市科技计划项目(2018D013)
作者简介:冯　波(1989-),四川南充人,博士,工程师.主要从事双金属复合材料开发方面的工作.
电话:020-61086608,E-mail:fengbo_1989@163.com

表1 钢/铁双金属复合锤头的化学成分 w(%)
Tab.1 Chemical composition of steel/iron bimetal hammer

材料	C	Cr	Mn	Si	S	P	Fe
低碳合金钢	0.25~0.30	1.0~1.2	1.0~1.2	0.8~1.0	<0.04	<0.04	余量
高铬铸铁	3.0~3.2	25.0~28.0	0.5~0.8	0.4~0.7	<0.04	<0.04	余量

合锤头,复合铸造示意图如图 1。液-液复合铸造时需要两台中频炉同时熔炼低合金钢和高铬铸铁,铸型中先浇入钢液,等待一定时间后再浇高铬铸铁铁液,使高铬铸铁铁液充满锤头的头部及其冒口部分,形成双金属复合锤头,凝固冷却后开箱去除锤头的浇冒口,获得复合锤头铸件。

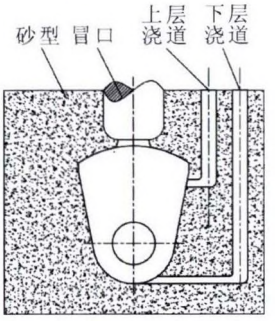

图 1 液-液复合铸造示意图
Fig.1 Schematic diagram of liquid-liquid compound casting

1.3 检测分析

采用 Leica DMI5000M 金相显微镜观察低合金钢、高铬铸铁以及复合界面的金相组织,腐蚀剂选用体积分数为 4%的硝酸酒精溶液;TESCAN VEGA3 扫描电镜用于观察钢 / 铁双金属复合锤头界面的微观组织和元素分布状态;Everone MH-5L 显微硬度计用于测试界面附近的显微硬度值;晶体学取向图采用背散射衍射(EBSD)分析,EBSD 测试是在 FEI Navo 400 场发射扫描电镜上进行, 所使用步长为 2 μm,EBSD 测试数据采用 Channel 5 软件处理。

2 试验结果及讨论

2.1 金相组织分析

本课题采用液-液复合铸造技术成功制备了钢 / 铁双金属复合锤头, 锤柄处选用韧性较好的低合金钢,工作面采用高耐磨性的高铬铸铁。利用线切割切取一定尺寸的复合试样, 进行研磨和抛光,分别对低合金钢基体、高铬铸铁基体以及复合界面进行化学腐蚀,观察其金相显微组织及界面结合情况。低合金钢基体的金相组织如图 2,从图中可以看出金相组织由网状的铁素体和珠光体组成。高铬铸铁基体的金相组织如图 3, 从图中可以看出金相组织由珠光体、二次渗碳体和低温莱氏体组成。复合试样界面的金相组织如图 4, 从图中可以看出界面两侧的基体材料都展现出各自应有的金相组织,并

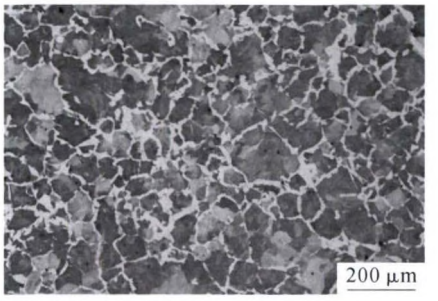

图 2 低合金钢基体的金相组织
Fig.2 Metallographic microstructure of low carbon steel

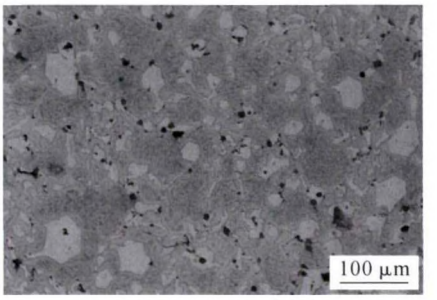

图 3 高铬铸铁基体的金相组织
Fig.3 Metallographic microstructure of high chromium cast iron

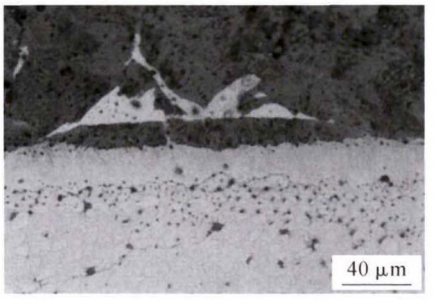

图 4 钢 / 铁双金属复合锤头界面的金相组织
Fig.4 Metallographic microstructure of steel/iron bimetal hammer interface

且在两种基体材料之间存在一个厚度约为 30 μm 的过渡层,中间过渡层与两侧的基体材料结合良好。因此,利用液-液复合铸造技术实现了低合金钢和高铬铸铁两种材料在界面处良好的冶金结合。

2.2 微观组织和织构分析

为了进一步分析钢 / 铁双金属复合试样的界面微观组织,对切取的复合试样进行研磨和抛光,随后进行扫描电镜观察。钢 / 铁双金属复合试样界面的 SEM 结果如图 5。从图 5 中看出,在液-液复合铸造过程中钢液和铁液在浇铸过程中没有出现明显的混液, 钢 / 铁双金属复合试样界面处有一个很好的冶金结合,并且界面处呈现出一个明显的过渡层,其厚度约为 30 μm。为了研究界面过渡层的形成机理,本

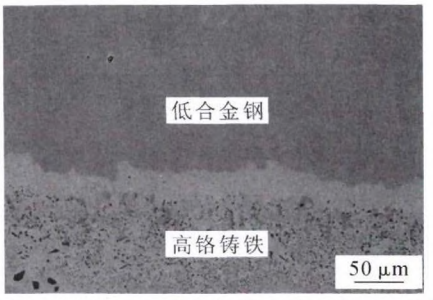

图 5 钢 / 铁双金属复合锤头界面的 SEM 图
Fig.5 SEM of steel/iron bimetal hammer interface

课题对钢 / 铁双金属复合试样界面进行了 EDS 线扫描分析，分析结果如图 6。从图 6 中看出，界面过渡层产生的主要原因是液–液复合铸造过程中两种基体材料在界面处发生明显的元素扩散。Fe 元素的含量从低合金钢一侧到高铬铸铁一侧均匀降低，Cr 元素的含量从低合金钢一侧到高铬铸铁一侧逐渐增加，结果表明低合金钢和高铬铸铁在液–液复合铸造过程中发生明显的元素扩散，复合界面结合良好。图 7 显示了钢 / 铁双金属复合试样的 EBSD 图，从图中可以看出液–液复合铸造制备的钢 / 铁双金属复合试样展现出一个典型的 <001> + <101> + <111> 的 3 种铸造织构，结果说明柱状晶的晶轴方向平行于 <001>、<101> 和 <111> 的晶粒优先生长。

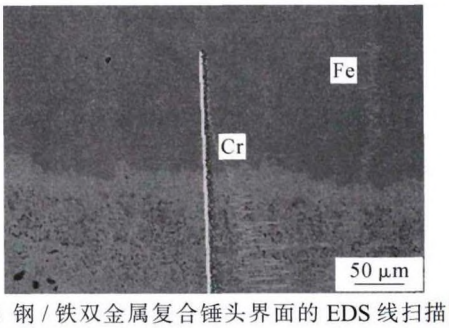

图 6 钢 / 铁双金属复合锤头界面的 EDS 线扫描图
Fig.6 EDS of steel/iron bimetal hammer interface

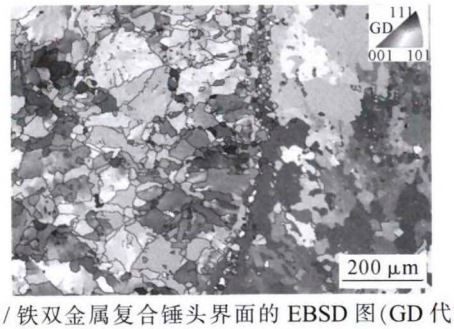

图 7 钢 / 铁双金属复合锤头界面的 EBSD 图（GD 代表柱状晶的生长方向）
Fig.7 EBSD of steel/iron bimetal hammer interface. GD refers to the growth direction of columnar crystals

2.3 显微硬度测试

为了测试钢 / 铁双金属复合试样界面处的性能，利用显微硬度计测试复合试样界面附近的硬度分布情况。以复合界面区域的硬度测试点为位移坐标原点，分别向左侧合金钢和右侧高铬铸铁依次选取 3 个硬度测试点（点与点的间距为 200 μm），每个硬度测试点测量 5 次后取平均值作为该点显微硬度值。试验选择载荷为 1 000 gf，加载时间为 20 s，试验结果如图 8。从图 8 中看出，复合界面处的显微硬度约为 333 HV，界面附近合金钢的显微硬度值为 230~265 HV，硬度值随着相对界面位移的减小呈逐渐上升的趋势。界面附近高铬铸铁的显微硬度值为 595~645 HV，硬度值随着相对界面位移的增加呈逐渐上升的趋势。结果表明，在液–液复合铸造过程中合金钢和高铬铸铁在复合界面处发生均匀的元素扩散，形成稳定的过渡区域，界面结合良好。

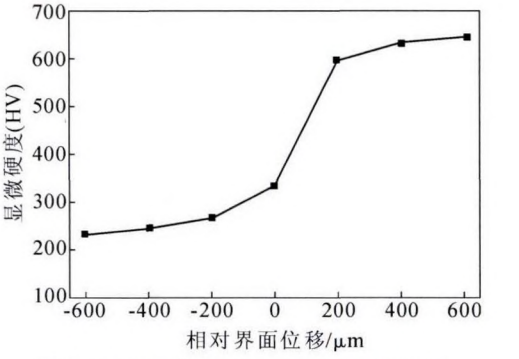

图 8 复合试样界面附近的显微硬度分布
Fig.8 Microhardness distribution of bimetal hammer interface

3 结论

本课题利用液–液复合铸造技术成功制备低合金钢 / 高铬铸铁双金属复合锤头，系统分析了钢 / 铁双金属复合锤头的界面组织及性能。结果表明，液–液复合铸造实现合金钢与高铬铸铁良好的冶金结合，界面处存在厚度约为 30 μm 的过渡层，界面处的显微硬度约为 333 HV。

参考文献：

[1] 彭成章，张小波. 多元高铬铸铁复合锤头的研制[J]. 热加工工艺, 2009, 38(91): 72-73.

[2] 温新林，王秀梅，袁兴华，等. 复合耐磨材料在发电厂耐磨件上的应用[J]. 热处理, 2011,26(3): 56-59.

[3] 李茂林. 国内外水泥工业用金属耐磨材料的发展和应用 [J]. 耐磨技术, 2006(1):43-46.

[4] 张春元，范国勇，吴伏家. 破碎机锤头材料的应用试验研究概况 [J]. 现代制造工程, 2006(1): 8-10.

[5] 柴增田，于立国. 破碎机锤头生产工艺发展现状 [J]. 矿山机械, 2005,33(3): 24-26.

[6] 冯朝跃. 双金属锤头的生产及应用 [J]. 铸造, 2000, 49(3): 561-562.

[7] B Feng, Y Xin, F Guo, et al. Compressive mechanical behavior of Al/Mg composite rods with different types of Al sleeve [J]. Acta Materialia, 2016(120): 379-390.

[8] B Feng, Y Xin, R Hong, et al. The effect of architecture on the mechanical properties of Mg-3Al-1Zn Rods Containing Hard Al Alloy Cores [J]. Scripta Materialia, 2015(98): 56-59.

[9] B Feng, Y Xin, Z Sun, et al. On the rule of mixtures for bimetal composites [J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 704: 173-180.

[10] B Feng, Y Xin, H Yu, et al. Mechanical behavior of a Mg/Al composite rod containing a soft Mg sleeve and an ultra hard Al core [J]. Materials Science and Engineering: A, 2016(675): 204-211.

[11] B Xiong, C Cai, H Wan, et al. Fabrication of high chromium cast iron and medium carbon steel bimetal by liquid - solid casting in electromagnetic induction field [J]. Materials & Design, 2011(32): 2978-2982.

[12] G Xie, H Sheng, J Han, et al. Fabrication of high chromium cast iron/low carbon steel composite material by cast and hot rolling process [J]. Materials & Design, 2010(31): 3062-3066.

[13] S Rong, H Zhou, R Zhu, et al. Study on liquid-liquid bimetal composite casting hammers [J]. China Foundry, 2014(11): 412-417.

[14] 吴振卿，王赞斌，侯成东，等. 高铬铸铁-低合金钢双金属复合锤头的研制[J]. 矿山机械, 2009(3)60-62.

[15] 李远扬，陈维平，郑开宏，等. 机械振动对双金属复合铸造行为的影响[J]. 铸造技术, 2017, 38(92): 377-381.

[16] 郭莹. 双金属锤头复合铸造工艺研究 [J]. 铸造技术, 2011, 33(12):1224-1226.

[17] 刘清梅，吴振卿，关绍康. 双金属复合锤头界面结合性能的研究[J]. 热加工工艺, 2003(1):12-14.

[18] 程巨强，贾劭冲，刘志学，等. 液-液复合铸造锤头组织和性能的研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2014(3):640-643.

(上接第 666 页)

备的铸件得到广泛应用，为航空航天和汽车部件的研制提供了基本保障，也为大型复杂、高要求零部件的研制生产开辟了新的途径，经济效益显著提高，同时还具有深远的社会效益。

参考文献：

[1] 夏建强，常峰，李雨. 选择性激光烧结技术在熔模铸造中的应用[J]. 铸造技术，2017，38(5):270-272.

[2] 杨锌，边毅，孙建新，等. 基于 3D 技术的快速砂型铸造新模式[J]. 特种铸造及有色合金，2017，37(11):73-75.

[3] 周宸宇，罗岚，刘勇，等. 金属增材制造技术的研究现状[J]. 热加工工艺，2018，47(6): 9-14.

[4] 陶攀，李怀学，许庆彦. 激光选区熔化工艺过程数值模拟的国内外研究现状[J]. 铸造，2017，66(7):695-701.

[5] 杨平华，高祥熙，梁菁，等. 金属增材制造技术发展动向及无损检测研究进展[J]. 材料工程，2017，45(9):13-21.

[6] Kang J W, Shangguan H L, Deng C Y, et al. Additive manufacturing-driven mold design for castings [J]. Additive Manufacturing, 2018, 22:472-478.

[7] 田国强，鲁中良，李涤尘. 基于增材制造技术的复杂结构模具数字化制造方法[J]. 航空制造技术，2014，453(9):38-41.

[8] 段望春，高佳佳，董兵斌，等. 3D 打印技术在金属铸造领域的研究现状与展望[J]. 铸造技术，2018，39(12):2895-2900.

[9] Hawaldar N, Zhang J. A comparative study of fabrication of sand casting mold using additive manufacturing and conventional process [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97(1-4):1037-1045.

[10] Almaghariz E S, Conner B P, Lenner L, et al. Quantifying the role of part design complexity in using 3D sand printing for molds and cores [J]. International Journal of Metalcasting, 2016, 10 (3): 240-252.

[11] Reddy S S, Jiayi W, Guha M. Non-conventional mold design for metal casting using 3D sand-printing[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018(34):765-775.

技术资料邮购

《铸造抗磨产品实用生产技术集》

《铸造抗磨产品实用生产技术集》本书由李德臣教授级高工编著。 共8章： 1、关于锰钢生产技术；2、球墨铸铁与蠕墨铸铁生产技术；3、抗磨产品生产技术；4、锤头生产技术；5、消失模、V法生产技术；6、典型铸件的生产技术；7、还原罐生产技术；8、关于企业管理。全书22万字。特快专递邮购价：98元。

邮购咨询：李巧凤　　电话/传真：029-83222071