DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2023.2286

低碳钢/高铬铸铁双金属材料组织及性能研究

汪　沙[1],王铁君[1],李传博[1],宋大拙[2],石　林[2],孙利星[2]
(1. 比亚迪汽车弗迪科技制动器工厂,陕西 西安 710100; 2. 西安理工大学 材料科学与工程学院,陕西 西安 710048)

摘　要:本实验通过真空熔渗扩散连接的方法,在不同结合温度下制备了高铬铸铁/低碳钢双金属材料,对其组织形貌进行观察,并对界面剪切强度及显微硬度进行测试。实验结果表明,在1 010、1 030、1 050 ℃下连接的界面组织形貌明显不同,在1 030 ℃的结合温度下剪切强度为320 MPa;在1 010 ℃及1 050 ℃下剪切强度分别为298 MPa和318 MPa。在1 010 ℃结合温度下CuCr中间层厚度达到90 μm,表明温度过低各元素扩散速率缓慢;1 050 ℃时CuCr中间层软化明显,最终形成的扩散层较窄且存在金属间化合物和显微孔洞,降低了双金属界面结合强度。

关键词:扩散连接;低碳钢;高铬铸铁;显微组织;强度

中图分类号:TG143　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2023)03-0252-05

Research on the Microstructure and Properties of Mild Steel/High Chromium Iron Bimetal Materials

WANG Sha[1], WANG Tiejun[1], LI Chuanbo[1], SONG Dazhuo[2], SHI Lin[2], SUN Lixing[2]
(1. BYD Fodi Technology Brake Factory, Xi'an 710100, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In this work, high chromium iron/mild steel bimetallic materials with different bonding temperatures were prepared using the method of vacuum melt infiltration diffusion bonding. The microstructure of the bimetallic materials was observed. Simultaneously, the interface shear strength and microhardness of the bimetallic materials were tested. The results show that the microstructures of the interface of the bimetallic materials aresignificantly different at 1 010 ℃, 1 030 ℃ and 1 050 ℃. The interface shear strength of the bimetallic materials is 320 MPa at 1 030 ℃, 298 MPa at 1 010 ℃ and 318 MPa at 1 050 ℃. The thickness of the CuCr interlayer reaches 90 μm at 1 010 ℃, indicating that the diffusion rate of elements is slow at low temperature. At 1 050 ℃, the CuCr interlayer softens obviously, and the diffusion layer is narrow with intermetallic compounds and microscopic pores, which reduces the interface shear strength of bimetallic materials.

Key words: diffusion bonding; mild steel; high-chromium iron; microstructure; strength

高铬铸铁兼具极佳的耐磨减磨性能,良好的耐高温和耐腐蚀性能,被广泛应用于汽车工业、军工等领域[1]。低碳钢具有较高的强度,塑韧性较好且具有优良的加工性能,常作为重型机械的结构件被广泛使用[2]。生产中常将高铬铸铁与低碳钢进行复合,以此来充分发挥高铬铸铁和低碳钢各自的优异性能,比如新型汽车常利用高铬铸铁与低碳钢复合材料来制作刹车盘等需兼具耐摩擦磨损性能、高强度和高塑韧性的零部件[3],张国赏等[4]利用离心铸造的方法制备了高性能的碳钢/高铬铸铁双金属复合材料。

由于2种材料的线膨胀系数、化学活性等有很大差异,制备的高铬铸铁/低碳钢双金属在复合界面两侧容易形成较大应力,在长时服役过程中经常出现剥离现象[5-6]。传统高铬铸铁/低碳钢双金属的制备方法主要有熔铸法、爆炸焊法、搅拌摩擦焊法等[7],熔铸法成本高昂、污染严重,且熔铸后的高铬铸铁烧损率得不到控制,严重影响材料的耐摩擦磨损性能,而无论是爆炸焊法还是搅拌摩擦焊法也都存在诸如环保、安全等方面的问题,且制备的双金属材料界面仅实现了机械咬合[8-10]。为此,本研究提出一种添加中间合金真空熔渗扩散连接的方法,实现高铬铸铁/低碳钢双金属材料的“固固”复合,为高性能的高铬

收稿日期:2022-09-20
基金项目:国家自然科学基金(52104385)
作者简介:汪　沙,1980年生,学士,工程师.主要从事金属材料成型、材料加工等方面的工作.电话:18682932580,
Email: 1003359350@qq.com
引用格式:汪沙,王铁君,李传博,等.低碳钢/高铬铸铁双金属材料组织及性能研究[J].铸造技术,2023,44(3): 252-256.
WANG S, WANG T J, LI C B, et al. Research on the microstructure and properties of mild steel/high chromium iron bimetal materials [J]. Foundry Technology, 2023, 44(3): 252-256.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

铸铁/低碳钢复合材料的制备提供理论支撑与实验参考。

1　实验材料及方法

本研究选用某自研高铬铸铁和低碳钢为原材料，通过感应熔炼制备了CuCr合金并轧制成厚度为100 μm的箔材作为中间层材料，具体成分如表1所示。选取厚度分别为15 mm和10 mm，尺寸为500 mm×500 mm[1]的高铬铸铁和低碳钢方形板材。

在自研真空热压炉中，采用添加中间合金真空熔渗扩散连接的方法，制备了高铬铸铁/低碳钢复合材料，具体制备过程如图1所示，将高铬铸铁和低碳钢的表面打磨，随后浸泡在10%(体积分数)的硝酸酒精溶液中酸洗，3种材料分别用酒精清洗并吹干后按照图1所示依次叠放整齐放置于热压模具中，将热压模具置入真空热压烧结炉中，在1 010、1 030、1 050 ℃下保温50 min，保温过程中施加5 MPa的压力，待高铬铸铁和低碳钢与CuCr中间层合金充分熔渗扩散完成后，停止加热并施加3 MPa压力，随炉冷却后得到高铬铸铁/低碳钢双金属材料。

表1 材料化学成分 *w*/%
Tab.1 Chemical composition of materials

材料	C	Si	Mn	Ni	Cu	Mo	Cr	Fe
高铬铸铁	2.0	1.5	2.5	2.5	1.2	1.5	17.5	Bal.
低碳钢	0.2	0.5	0.5	-	-	-	2.0	Bal.
CuCr	-	-	-	-	93.0	-	7.0	-

在将试样按照常规方法磨抛后，配置HNO_3:酒精体积比为1.0:3.5的腐蚀液进行腐蚀，利用JSM-6700F型场发射扫描电镜(SEM)对合金组织形貌进行观察。剪切实验在SANS-CMT5205微机控制电子万能试验机上进行，调整横梁位移速率为2.5 mm/min，加载至试样断裂，为保证数据的准确性，共测试3个试样。

2　实验结果及分析

2.1　高铬铸铁/低碳钢双金属界面组织形貌

图2(a~c)分别显示了高铬铸铁/低碳钢双金属在1 010、1 030、1 050 ℃连接温度下的界面组织形貌，图2(d)为1 030 ℃下的界面EDS线扫描结果。从图2(a)可知，CuCr中间层的厚度大于其余温度，证明这一温度下CuCr中间层的元素向两端发生了短距离的扩散，图2(c)相较于图2(b)可以看出，在高铬铸铁/低碳钢界面处出现大量金属间化合物。通过测量1 010 ℃结合温度下中间层厚度约为90 μm，1 030 ℃时约为42 μm，1 050 ℃时约为30 μm，由此可知，随着温度升高，CuCr中间层软化程度不断增加，1 050 ℃下的CuCr中间层已经完全液化，较大的过热度使得在这一温度下的复合界面出现金属间化合物。此外，不同温度下制备的双金属在低碳钢/CuCr界面、CuCr/高铬铸铁界面均出现大片的固溶体，1 030 ℃时这一现象更加明显。观察图2(d)可知，Fe元素在整个扩散界面上分布均匀，表明铁元素发生了远距离的扩散，而Cu元素仅发生了40 μm的迁移，其中在高铬铸铁/CuCr以及CuCr/低碳钢界面上Cu元素的含量出现峰值，这是由于Fe原子大量固溶进入Cu晶胞当中，生成Fe/Cu固溶体。EDS点扫描结果表明，这些固溶体是由C、Fe、Cr、Cu元素形成的，如表2所示。即高铬铸铁和低碳钢侧的元素通过整个CuCr中间层发生扩散，导致C、Fe、Cr、Cu元素在CuCr中间层处发生反应并形成固溶体，最终在CuCr中间层处发生冶金结合[11]。

表2 图2(c)中A点和B点元素含量 *w*%
Tab.2 Element content at point A and point B in Fig.2(c)

位置	元素			
	C	Fe	Cr	Cu
A	3.52	82.82	6.66	6.99
B	4.22	83.52	7.66	4.60

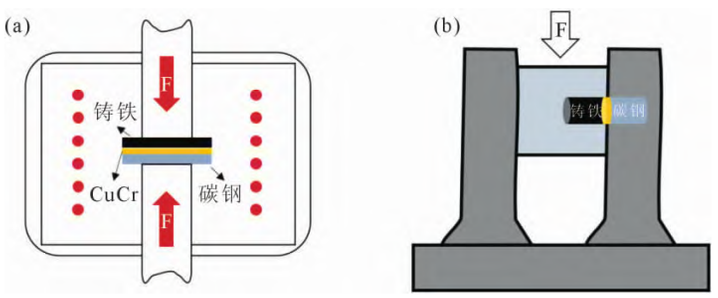

图1 高铬铸铁/低碳钢复合材料制备：(a) 高铬铸铁/低碳钢熔渗扩散连接示意图，(b) 剪切实验示意图
Fig.1 Preparation of high chromium iron/mild steel composite:(a) high chromium iron/mild steel penetration diffusion connection diagram; (b) schematic diagram of shear experiment

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

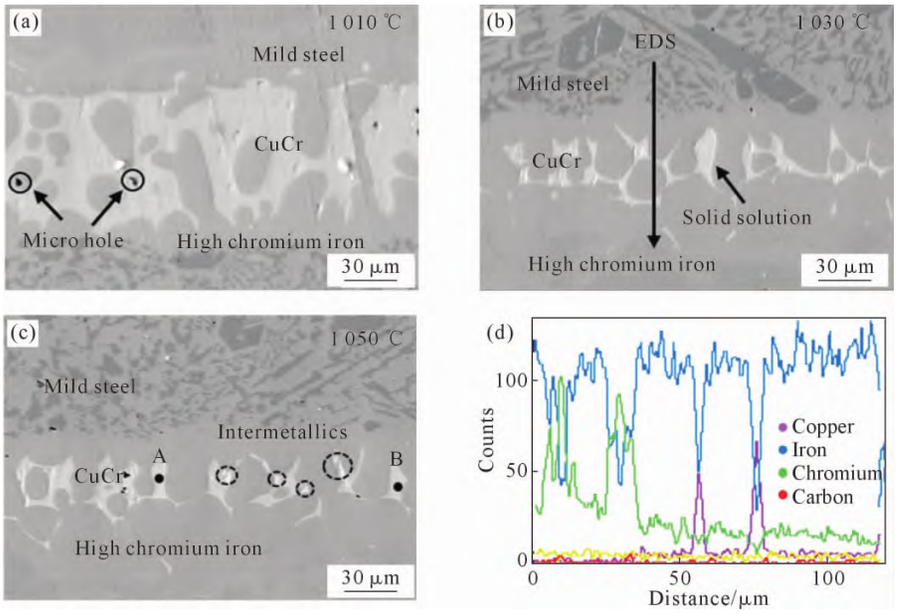

图 2 高铬铸铁/低碳钢双金属在不同连接温度下的界面组织形貌:(a) 1 010 ℃,(b) 1 030 ℃,(c) 1 050 ℃,(d) 图 (b) EDS 线扫描结果

Fig.2 Interface microstructure of high chromium iron/mild steel bimetal materialsat different temperatures: (a) 1 010 ℃, (b) 1 030 ℃, (c) 1 050 ℃, (d) EDS line scanning results in (b)

2.2 高铬铸铁/低碳钢双金属界面剪切实验

图 3 为高铬铸铁/低碳钢双金属在不同结合温度下的剪切实验应力–应变曲线。从图 3 可以看出,高铬铸铁/低碳钢双金属在 1 030 ℃的结合温度下表现出最高的剪切强度,强度为 320 MPa。在 1 010 ℃以及 1 050 ℃的结合温度下最高剪切强度分别为 298 MPa 和 318 MPa。观察图 2(a)在结合温度为 1 010 ℃下的双金属界面 SEM 图像发现,高铬铸铁/CuCr 界面一侧出现显微孔洞,且复合后的 CuCr 中间层宽度远大于其余温度下的宽度,说明在这一温度下 CuCr 中间层与两侧的复合特征呈现为固固复合,扩散速率较慢,因此 CuCr 中间层被完整的保留了下来,导致界面结合强度较低[12]。观察图 2(c)高铬铸铁/低碳钢双金属在 1 050 ℃连接后的界面形貌发现,无论是在高铬铸铁/CuCr 界面还是 CuCr/低碳钢界面上均分布着大量硬脆金属间化合物,导致界面处塑性差,强度较低。对比图 2(b)可知,高铬铸铁/低碳钢双金属在 1 030 ℃的结合温度下界面组织为以 C、Fe、Cr、Cu 为主要元素组成的固溶体,且界面无明显微观缺陷,因此双金属界面强度较高,达到了较好的连接效果[13]。

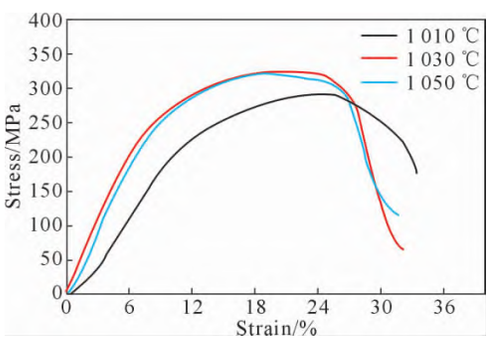

图 3 不同温度下高铬铸铁/低碳钢双金属界面剪切应力–应变曲线

Fig.3 Shear stress-strain curves of the high chromium iron/mild steel bimetal interface at different temperatures

为了进一步确定在 1 030 ℃结合温度下双金属界面处形成的化合物种类,研究了双金属材料在 1 030 ℃结合温度下的显微硬度。显微硬度相比普通硬度测量方法,优势在于可度量材料中各个相或金属表面极薄层的硬度[14]。图 4 为高铬铸铁/低碳钢双金属跨界面的显微硬度分布结果,图 4(b)中坐标点具体位置见图 4(a),图中呈现了从高铬铸铁至低碳钢的 7 个点的测量结果。由图可知,在高铬铸铁侧,3 个测量结果的显微硬度值波动不大,原因主要是高铬铸铁中含有大量的 Cr 元素,高含量的 Cr 元素易与中间层 CuCr 发生溶质交换形成较均匀的固溶体扩散层,因此观察到靠近高铬铸铁一侧硬度变化不大。随着距高铬铸铁一侧距离的增加,双金属界面显微硬度值迅速上升,显微硬度均值由 252 HV 升至 1 217 HV,呈线性增加的趋势,在低碳钢侧,随着距 CuCr/低碳钢界面距离的增加,显微硬度均值稳定在 1 200 HV 左右,说明在靠近低碳钢一侧,CuCr/低碳钢界面形成的化合物以碳化物为主,且低碳钢中含有大量碳化物[15],因此随着距离增加显微硬度稳定在 1 200 HV 左右。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

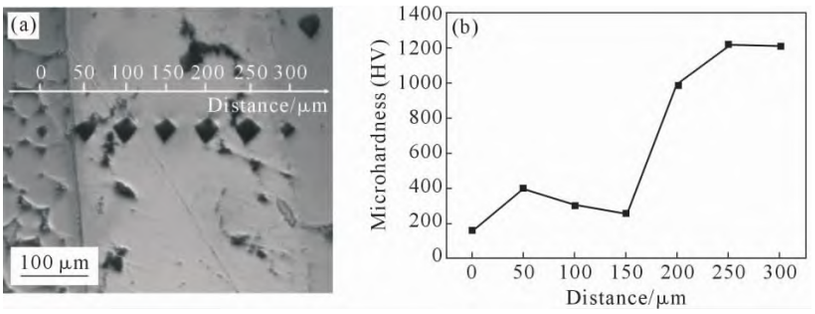

图 4 1 030 ℃结合温度下高铬铸铁/低碳钢双金属界面显微硬度测试:(a) 显微硬度测试界面组织形貌,(b) 显微硬度测试结果

Fig.4 Microhardness test of the high chromium iron/mild steel interface at 1 030 ℃: (a) interface morphology, (b) results of the microhardness test

3 结论

(1)高铬铸铁/低碳钢双金属在 1 010、1 030、1 050 ℃连接温度下的界面组织形貌明显不同,在 1 010 ℃结合温度下 CuCr 中间层厚度达到 90 μm,表明温度过低各元素扩散缓慢,溶质原子迁移形成的扩散层较窄。1 030 ℃连接温度下的界面组织主要为元素 Cr、Fe、Cu 形成的固溶体,1 050 ℃下 CuCr 中间层软化明显,界面组织存在大量金属间化合物。

(2)高铬铸铁/低碳钢双金属在 1 010、1 030、1 050 ℃连接温度下的界面组织形貌显著影响着双金属的界面剪切强度,在 1 030 ℃的结合温度下剪切强度为 320 MPa。在 1 010 ℃以及 1 050 ℃的结合温度下剪切强度分别为 298 MPa 和 318 MPa。

(3)随着结合温度升高,双金属界面剪切强度表现为先上升后下降,上升是由于在 1 030 ℃时,CuCr 中间层的 C、Fe、Cr、Cu 元素在热激活能增大的情况下扩散通量增加,溶质原子迁移在高铬铸铁/CuCr 界面以及 CuCr/低碳钢界面处形成固溶体,提高了双金属的界面结合强度。随着温度升高到 1 050 ℃,CuCr 中间层软化明显,扩散层较窄且凝固时造成溶质原子偏析,界面处形成大量金属间化合物,使双金属界面塑韧性变差,降低界面结合强度。

参考文献:

[1] 肖小峰,周晓光,叶升平,等. 高铬铸铁/碳钢双液双金属耐湿磨衬板的消失模复合铸造[J]. 铸造,2011, 60(7): 632-634.
XIAO X F, ZHOU X G, YE S P, et al. High chromium cast iron/carbon steel liquid composite liner by lost foam casting[J]. Foundry, 2011, 60(7): 632-634.

[2] 皇志富,刑建东,高义民. 半固态过共晶高铬铸铁的制备及组织定量分析[J]. 铸造技术,2004, 25(10): 756-758.
HUANG Z F, XING J D, GAO Y M. Preparation of semisolid hypereutectic high chromium cast iron and quantitative analysis of microstructure[J]. Foundry Technology, 2004, 25(10): 756-758.

[3] JANG H, KO K, KIM S J. The effect of metal fibers on the friction performance of automotive brake friction materials [J]. Wear, 2004, 256(3-4): 406-414.

[4] 张国赏,高义民,邢建东,等. 碳钢/高铬铸铁双金属复合材料制备工艺及其磨损性能 [J]. 铸造技术,2005, 26 (11): 1006-1008, 1011.
ZHANG G S, GAO Y M, XING J D, et al. Processing andwear resistance of carbon-steel/high-Cr-cast-iron biemetal composite[J]. Foundry Technology, 2005, 26(11): 1006-1008, 1011.

[5] SUN L X, SONG X H, DONG Y T. Microstructure and strength of diffusion bonded 304 stainless steel/tungsten joints using different interlayers [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 65: 428-434.

[6] SAKURAI I, MAEDONO H, MATSUO K, et al. Diffusion bonding of high chromium cast iron to cast steel in air[J]. Journal of Japan Foundry Engineering Society, 1996, 68(1): 43-48.

[7] GAO X J, JIANG Z Y, WEI D B. Effects of temperature and strain rate on microstructure and mechanical properties of high chromium cast iron/low carbon steel bimetal prepared by hot diffusion-compression bonding [J]. Materials & Design, 2014, 63: 650-657.

[8] XIONG B W, CAI C C, HONG W, 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(5): 2978-2982.

[9] 李玉龙,杨泓,刘冠鹏,等. 铜/钢爆炸焊接头界面组织及力学性能研究[J]. 材料科学与工艺,2020, 28(1): 39-45.
LI Y L, YANG H, LIU G P, et al. Microstructure and mechanical properties of explosive welded joint of copper/steel [J]. Materials Science and Technology, 2020, 28(1): 39-45.

[10] 韩丽青,王自东,申曦. TA2/316L 的连接技术及其腐蚀与防护[J]. 铸造技术,2007, 28(4): 550-552.
HAN L Q, WANG Z D, SHEN X. Joint technique of TA2/316L and its corrosion and protection[J]. Foundry Technology, 2007, 28 (4): 550-552.

[11] KURT B, ORHAN N, HASÇALIK A. Effect of high heating and cooling rate on interface of diffusion bonded gray cast iron to medium carbon steel[J]. Materials & Design, 2007, 28(7): 2229-2233.

[12] BIN AYOB F, BIN HUSSAIN P, BIN ABDULLAH A, et al. Unconventional approach in the study of diffusion welding of marine grades grey cast iron to low carbon steel[J]. Materials Today: proceedings, 2020, 29:156-160.

[13] DUBROVSKY V A, AMELICHEVA A, KALMYKOV E S. Re-

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

search of electric resistance surfacing (welding-on) of cylindrical steel and cast iron samples with low-carbon low-alloyed filler wire [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 971: 032006.

[14] NAKANO K, YASUNAKA T. Fracture toughness in the transition region of a carbon steel and a ferritic nodular cast iron [J]. Tetsu To Hagane-journal of The Iron and Steel Institute of Japan, 1995, 81(3): 209-213.

[15] 林勇坚. PLC 控制的焊接工艺对高强钢焊接性能的影响 [J]. 铸造技术, 2014, 35(12): 3011-3013, 3017.
LIN Y J. Effect of welding process based on PLC control on weldability of high strength steel [J]. Foundry Technology, 2014, 35 (12): 3011-3013, 3017.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net